
ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДГТУ
Вестник
Донского государственного технического университета
Теоретический и научно-практический журнал
Vestnik of Don State Technical University
Том 19 № 4 2019
Vol. 19 no. 4 2019
ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
1 Механика
Mechanics
2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science
3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management
DOI 10.23947/1992-5980
vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Т. 19, № 4

Теоретический
и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
октябрь-декабрь 2019 г.

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
DOI: 10.23947/1992-5980

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)
05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)
05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)
05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также в международной базе EBSCO
Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 35578

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 26.12.2019., дата выхода в свет 26.12.2019.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,6.
Тираж 1000 экз. Заказ № 26/12 Цена свободная.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik.donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА

Акопян А. Г. О прочности соединения составной анизотропной пластины, жестко защемленной по внешним краям 304

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Антибас И. Р., Амер Карнуб, Дьяченко А. Г. Влияние волнового эффекта на предел прочности волокна при испытаниях композитного материала на растяжение 310

Сова А. Н. , Степанов М. И. , Сова В. А. , Быков А. И. Теоретические основы моделирования динамических характеристик приводов перспективных космических аппаратов с учетом функционирования осцилляторов 317

Кудряков О. В., Варавка В. Н., Забияка И. Ю., Ядрец Э. А., Шведчикова О. В. Анализ начальной стадии усталостного износа гетероструктурных материалов в условиях контактных циклических нагрузок 328

Киреев А. Н., Склифус Я. К., Киреева М. А. Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог 335

Карнаухов Н. Ф., Смяцкий Д. А., Филимонов М. Н., Руднев К. И. Обеспечение точностных параметров движения звена промышленного робота в зоне малой скорости 342

Полосков С. С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматурыи пути их решения 349

Колпахчьян П. Г., Ольховатов Д. В. Бездатчиковое управление высокооборотным вентильно-индукторным генератором микроэнергетической установки 357

Дроган Е. Г., Бурлакова В. Э. Исследование поверхности трибоконтакта после трения в водном растворе капроновой кислоты 366

Кобзев К. О. Повышение стабильности функционирования рабочего органа в кривошипных прессах 374

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Пономарева Л. А., Ромашкова О. Н. , Белякова А. Н., Заболотникова В. С. Автоматизация процесса многокритериального ранжирования студентов с помощью электронного портфолио 382

Коновалов И. С., Фатхи В. А., Кобак В. Г. Повышение эффективности работы генетического алгоритма в процессе решения задачи покрытия множеств 389

Карпинская Т. А., Кудрявцев О. Е. Методы имитационного математического моделирования российского срочного рынка на современном этапе 398

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 593.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-304-309

О прочности соединения составной анизотропной пластины, жестко защемленной по внешним краям*

А. Г. Акопян[1**]
[1]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) Северо-Кавказский филиал, Лермонтов, Российская Федерация

On joint efficiency of composite anisotropic plate rigidly fixed along outside edges***

A. G. Akopyan[1**]
[1]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), North Caucasus branch, Lermontov, Russian Federation

Введение. Современные технологические процессы сварки, наплавки, пайки и склеивания позволяют изготовлять элементы конструкций из монолитно соединенных между собой разнородных анизотропных материалов. Комбинирование различных материалов, обладающих качествами, соответствующими тем или иным условиям эксплуатации, открывает большие возможности для повышения технических и экономических характеристик машин, оборудования и сооружений. Оно может способствовать значительному увеличению их надежности, долговечности, уменьшению расходов на изготовление и эксплуатацию.
Материалы и методы. Целью работы является изучение предельного напряженного состояния анизотропных составных пластин в рамках классической теории изгиба пластин. Внешние края пластины считаются свободными. Используя классическую теорию изгиба анизотропной пластины в пространстве физических и геометрических параметров, получены уравнения гиперповерхности, определяющие зоны малонапряженности для края контактной поверхности составной цилиндрически ортотропной пластины.
Результаты исследования. Нахождение критериев инженерных сооружений, позволяющих определить предельные прочностные характеристики элементов конструкций, является одной из актуальных задач механики деформируемого твердого тела. Проблемы прочности в конструкциях часто сводятся к выяснению характера местного напряженного состояния у вершин стыков составляющих частей. Данная статья посвящена решению этой проблемы для составных анизотропных пластин в области их изгиба.
Обсуждение и заключения. Решение, предлагаемое в данной работе, может быть полезным для повышения прочности композитных изделий.

Ключевые слова: малонапряженность, изгиб пластин, анизотропный, составной, жестко защемленный, угловое ребро, классическая теория изгиба, линейно упругий.

Introduction. Modern processes of welding, surfacing, soldering and bonding provide producing structural elements of monolithic interconnected dissimilar anisotropic materials. The combination of different materials with qualities corresponding to certain operating conditions offer comprehensive facilities to improve the technical and economic characteristics of machines, equipment and structures. It can contribute to a significant increase in their reliability, durability, and to reduction of the production and operation costs.
Materials and Methods. The work objective is to study the boundary state of stress of anisotropic composite plates in the framework of the classical theory of plate bending. The outer edges of the plate are considered free. Using the classical theory of bending of an anisotropic plate in the space of physical and geometric parameters, hypersurface equations are obtained that define low-stressed zones for the contact surface edge of a cylindrical orthotropic composite plate.
Research Results. Finding the criteria for engineering structures to determine the limiting strength characteristics of structural elements is one of the urgent tasks of the deformable solid mechanics. Strength problems in structures are often reduced to elucidating the nature of the local stress state at the tops of the joints of the constituent parts. This paper is devoted to solving this problem for composite anisotropic plates in the area of their bending.
Discussion and Conclusions. The solution proposed in this paper may be useful for increasing the strength of composite products.

Keywords: low-stressed level, plate bending, anisotropic, composite, rigidly fixed, angle rib, classical theory of bending, linearly elastic.



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: manakofoto@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Акопян А. Г. О прочности соединения составной анизотропной пластины, жестко защемленной по внешним краям / А. Г. Акопян // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №4. — С. 304−309. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-304-309

For citation: A.G. Akopyan. On joint efficiency of composite anisotropic plate rigidly fixed along outside edges. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 304−309. https://doi.org/10.23947/ 1992-5980-2019-19-4-304-309

Введение. Рассматривается малонапряженное состояние около углового ребра края контактной поверхности соединения двух различных, жестко защемленных по внешним краям цилиндрически ортотропных пластин одинаковой толщины [1–5] в рамках классической теории изгиба линейно упругих анизотроных пластин [6, 7], жестко защемленных по внешним краям. Исследование поведения напряжений в вершине угла при изгибе однородной изотропной пластины, имеющей угловое ребро, по классической теории изгиба пластин было проведено в работе [8]. Последующее рассмотрение этой задачи по уточненной теории Рейсснера показало, что перерезывающие силы в этом крае конечны [9]. В работе [10] экспериментально показано существование и расположение зон малонапряженности и концентрации напряжений в угловых точках составных пластин. Случай изгиба неоднородной составной плиты рассмотрен в [11].

Поверхность, соединяющая две пластины, вертикальна к срединной плоскости. Такая составная пластина подвержена изгибу под общей поперечной нагрузкой. Окрестность краевого ребра контактной поверхности соединения свободна от внешних сил. Поместим начало цилиндрической системы координат в угловой точке срединной плоскости пластины. На рис. 1 показана плоскость z=0. Принимаем, что главные оси анизотропии совпадают с осями этой цилиндрической системы координат. Толщину пластины обозначим h, а величины в окрестности точки r=0, относящиеся к областям 0≤θ≤α, -h/2≤z≤h/2 и -β≤θ≤0, -h/2≤z≤h/2, отмечаем индексами i=1, 2 соответственно.

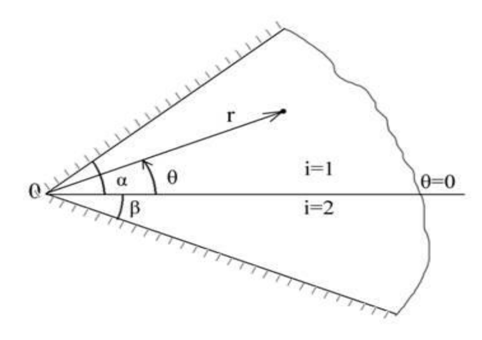


Рис. 1. Схема составной пластины

Материалы и методы. Прогиб w_i каждой области ортотропной пластины в окрестности точки r=0 определяется из уравнения [3]:

$$D_{ri}\frac{\partial^4 w_i}{\partial r^4}+2D_{r\theta i}\frac{1}{r^2}\frac{\partial^4 w_i}{\partial r^2\partial\theta^2}+D_{\theta i}\frac{1}{r^4}\frac{\partial^4 w_i}{\partial\theta^4}+2D_{ri}\frac{1}{r}\frac{\partial^3 w_i}{\partial r^3}-2D_{r\theta i}\frac{1}{r^3}\frac{\partial^3 w_i}{\partial r\partial\theta^2}--D_{\theta i}\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2}+2(D_{\theta i}++D_{r\theta i})\frac{1}{r^4}\frac{\partial^2 w_i}{\partial\theta^2}+D_{\theta i}\frac{1}{r^3}\frac{\partial w_i}{\partial r}=0\ , (1)$$

где $D_{ri}, D_{\theta i}, D_{r\theta i}$ — жесткости каждой области анизотропной пластины:

$$D_{ri}=\frac{E_{ri}}{12(1-\nu_{ri}\nu_{\theta i})}h^3;\ D_{\theta i}=\frac{E_{\theta i}}{12(1-\nu_{ri}\nu_{\theta i})}h^3;\ D_{r\theta i}=D_{ri}\nu_{\theta i}+2D_{ki};\ D_{ki}=\frac{G_i}{12}h^3$$

Здесь $E_{ri},\ E_{\theta i}, \nu_{ri}, \nu_{\theta i}, G_i$ — параметры анизотропии каждой области.

Представляя прогиб пластины в форме

$$w_i(r,\theta)=r^{\lambda+1}f_i(\theta\ ,\lambda), \qquad (2)$$

где f_i и λ — искомые функции и постоянная, из уравнения (1) будет следовать

$$f_i''''+2(k_{1i}\lambda^2+1)\,f_i''+(\lambda^2-1)\,(k_{2i}\lambda^2-1)f_i=0, \qquad (3)$$

где $k_{1i}={}^{D_{r\theta i}}/_{D_{\theta i}}$, $k_{2i}={}^{D_{ri}}/_{D_{\theta i}}$.

Корни соответствующего характеристического уравнения для (3) определяются из следующего выражения

$$r_{(1,2,3,4)i}=\pm\sqrt{-(k_{1i}\lambda^2+1)\pm\lambda\sqrt{(k_{1i}^2-k_{2i})\lambda^2+2k_{1i}+k_{2i}+1}}=\pm\sqrt{-a\pm b} \qquad (4)$$

Нужно будет рассмотреть три следующих случая:

1) Все четыре корня (4) мнимые $(a\ge b, b$ — величина действительная$)$

$$r_{(1,2,3,4)i}=\pm\omega_{ki}i,$$

где случай k=1 соответствует нижнему знаку под радикалом (4), а k=2 — верхнему.

2) Все корни (4) комплексные $(b$ — величина мнимая$)$.

$$r_{(1,2,3,4)i} = \pm(\xi_i \pm i\eta_i).$$

3) Одна пара корней действительная, а другая — мнимая (а$< b, b$ — действительная).

$$r_{(1,2)i} = \pm\xi_i, r_{(3,4)i} = \pm\eta_i i.$$

Для каждого из случаев напишем общее решение уравнения (3):

$$\begin{gathered}1)\ f_i{=}A_i \cos\omega_{1i}\,\theta{+}B_i \sin\omega_{1i}\,\theta{+}C_i\cos\omega_{2i}\,\theta{+}E_i\sin\omega_{2i}\,\theta \\ 2)\ f_i{=}A_i\cosh\xi_i\,\theta\cos\eta_i\,\theta + B_i\sinh\xi_i\theta\cos\eta_i\,\theta + C_i\cosh\xi_i\,\theta\sin\eta_i\theta + {+}E_i\sinh\xi_i\theta\sin\eta_i\theta \\ 3)\ f_i{=}A_i\cosh\xi_i\,\theta{+}B_i\sinh\xi_i\theta + C_i\cos\eta_i\,\theta{+}E_i\sin\eta_i\theta,\end{gathered} \tag{5}$$

где A_i, B_i, C_i, E_i — произвольные постоянные.

Тогда для моментов будем иметь

$$\begin{gathered}M_{ri} = -D_{ri}r^{\lambda-1}[\nu_{\theta i}f_i'' + (\lambda+1)(\lambda+\nu_{\theta i})f_i] \\ M_{\theta i} = -D_{\theta i}r^{\lambda-1}[f_i'' + (\lambda+1)(\nu_{ri}\lambda+1)f_i] \\ M_{r\theta i} = -2D_{ki}r^{\lambda-1}f_i'\end{gathered} \tag{6}$$

перерезывающие силы будут вычисляться по формулам:

$$\begin{gathered}Q_{ri} = -r^{\lambda-2}[(D_{r\theta i}\lambda - D_{\theta i})f_i'' + (\lambda+1)(D_{ri}\lambda^2 - D_{\theta i})f_i] \\ Q_{\theta i} = -r^{\lambda-2}[D_{\theta i}f_i''' + (\lambda+1)(D_{r\theta i}\lambda + D_{\theta i})f_i']\end{gathered} \tag{7}$$

Для обобщающей перерезывающей силы будем иметь

$$V_{\theta i} = Q_{\theta i} + \frac{\partial M_{r\theta i}}{\partial r} = -r^{\lambda-2}(D_{\theta i}f_i''' + g_i f_i'), \tag{8}$$

где

$$g_i = (\lambda+1)D_{\theta i} + \lambda[(\lambda+1)D_{r\theta i} + 2(\lambda-1)D_{ki}].$$

На контактной поверхности ($\theta = 0$) следует соблюдать условия непрерывности прогиба, угла поворота, изгибающего момента и обобщенной перерезывающей силы.

$$\begin{gathered}f_1 = f_2\,, f_1' = f_2', D_{\theta 1}f_1''' + g_1 f_1' = D_{\theta 2}f_2'''{+}g_2 f_2', \\ D_{\theta 1}[f_1'' + (\lambda+1)(\nu_{r1}\lambda+1)f_1] = D_{\theta 2}[f_2'' + (\lambda+1)(\nu_{r2}\lambda+1)f_2].\end{gathered} \tag{9}$$

Рассмотрим граничные условия на внешних краях ($\theta = \alpha, \theta = -\beta$) пластины. В случае жестких заделок

$$f_i' = f_i = 0, \tag{10}$$

Подставляя значение f_i из (5) в граничные условия (9) и (10), получаем три системы восьми линейных уравнений относительно восьми постоянных A_i, B_i, C_i, E_i для каждого из трех случаев в (5).

Для случая 1:

$$\begin{gathered}A_1{+}\ C_1 - A_2{-}\ C_2{=}0 \\ \omega_{11}B_1{+}\omega_{21}E_1{-}\omega_{12}B_2{-}\omega_{22}E_2{=}0 \\ D_{\theta 1}q_{11}A_1 + D_{\theta 1}q_{21}C_1 - D_{\theta 2}q_{12}A_2 - D_{\theta 2}q_{22}C_2{=}0 \\ \omega_{11}p_{11}\,B_1{+}\omega_{21}p_{21}\,E_1 - \omega_{12}p_{12}\,B_2 - \omega_{22}p_{22}\,E_2 = 0 \\ A_1\cos\omega_{11}\,\alpha{+}B_1\sin\omega_{11}\alpha{+}C_1\cos\omega_{21}\,\alpha{+}E_1\sin\omega_{21}\,\alpha{=}0 \\ A_1\omega_{11}\sin\omega_{11}\,\alpha - B_1\omega_{11}\cos\omega_{11}\alpha{+}C_1\omega_{21}\sin\omega_{21}\,\alpha - E_1\omega_{21}\cos\omega_{21}\,\alpha{=}0 \\ A_2\cos\omega_{12}\,\beta - B_2\sin\omega_{12}\,\beta\ {+}C_2\cos\omega_{22}\beta - E_2\sin\omega_{22}\,\beta{=}0 \\ A_2\,\omega_{12}\sin\omega_{12}\,\beta + B_2\,\omega_{12}\cos\omega_{12}\,\beta\ {+}C_2\omega_{22}\sin\omega_{22}\beta + E_2\,\omega_{22}\cos\omega_{22}\,\beta{=}0\end{gathered} \tag{11}$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\begin{gathered}p_{ji}{=}(\ \lambda+1-\omega_{ji}^2)\,D_{\theta i}{+}\lambda[(\lambda+1)D_{r\theta i} + 2(\lambda-1)D_{ki}] \\ q_{ji}{=}(\lambda+1)(\nu_{ri}\lambda+1)\text{-}\omega_{ji}^2,\ \text{j=1, 2}\end{gathered}$$

Для случая 2:

$$\begin{gathered}A_1 - A_2 = 0, \xi_1 B_1 + \eta_1 C_1 - \xi_2 B_2 - \eta_2 C_2 = 0 \\ \omega_1 D_{\theta 1}A_1 + 2D_{\theta 1}\xi_1\eta_1 E_1 - \omega_2 D_{\theta 2}A_2 - 2D_{\theta 2}\xi_2\eta_2 E_2 = 0 \\ p_1\,B_1{+}q_1 C_1 - p_2\,B_2 - q_2 C_2{=}0 \\ A_1\cosh\xi_1\,\alpha\cos\eta_1\,\alpha + B_1\sinh\xi_1\alpha\cos\eta_1\,\alpha + C_1\cosh\xi_1\,\alpha\sin\eta_1 \propto {+}E_1\sinh\xi_1 \propto \sin\eta_1 \propto = 0 \\ A_1\,(\xi_1\sinh\xi_1\,\alpha\cos\eta_1\,\alpha - \eta_1\cosh\xi_1\,\alpha\sin\eta_1\alpha) \\ {+}B_1\,(\cosh\xi_1\alpha\cos\eta_1\,\alpha - \eta_1\sinh\xi_1 \propto \sin\eta_1 \propto) \\ {+}C_1\,(\xi_1\sinh\xi_1\,\alpha\sin\eta_1 \propto + \eta_1\cosh\xi_1\,\alpha\cos\eta_1\,\alpha \\ {+}E_1(\xi_1\cosh\xi_1 \propto \sin\eta_1 \propto + \eta_1\sinh\xi_1\,\alpha\cos\eta_1\,\alpha) = 0 \\ A_2\cosh\xi_2\,\beta\cos\eta_2\,\beta - B_2\sinh\xi_2\beta\cos\eta_2\,\beta - C_2\cosh\xi_2\,\beta\sin\eta_2\beta{+}E_2\sinh\xi_2\beta\sin\eta_2\beta = 0 \\ A_2\,(\xi_2\sinh\xi_2\,\beta\cos\eta_2\,\beta - \eta_2\cosh\xi_2\,\beta\sin\eta_2\beta)\end{gathered} \tag{12}$$

$$-B_2(\xi_2\cosh\xi_2\beta\cos\eta_2\beta-\eta_2\sinh\xi_2\beta\sin\eta_2\beta)$$
$$-C_2(\xi_2\sinh\xi_2\beta\sin\eta_2\beta+\eta_2\cosh\xi_2\beta\cos\eta_2\beta)+E_2(\xi_2\cosh\xi_2\beta\sin\eta_2\beta+\eta_2\sinh\xi_2\beta\cos\eta_2\beta)$$
$$=0,$$

где обозначены

$$\omega_i=\xi_i^2-\eta_i^2+(\lambda+1)(\nu_{ri}\lambda+1)$$
$$p_i=\xi_i\{(\xi_i^2-3\eta_i^2+\lambda+1)D_{\theta i}+\lambda[(\lambda+1)D_{r\theta i}+2(\lambda-1)D_{ki}]\}$$
$$q_i=\eta_i\{(3\xi_i^2-\eta_i^2+\lambda+1)D_{\theta i}+\lambda[(\lambda+1)D_{r\theta i}+2(\lambda-1)D_{ki}]\}$$

Для случая 3:

$$A_1+C_1-A_2-C_2=0 \quad (13)$$
$$\xi_1B_1+\eta_1E_1-\xi_2B_2-\eta_2E_2=0$$
$$a_1D_{\theta1}A_1-b_1D_{\theta1}C_1-a_2D_{\theta2}A_2+b_2D_{\theta2}C_2=0$$
$$\xi_1p_1B_1-\eta_1q_1E_1-\xi_2p_2B_2+\eta_2q_2E_2=0$$
$$A_1\cosh\xi_1\alpha+B_1\sinh\xi_1\alpha+C_1\cos\eta_1\propto+E_1\sin\eta_1\propto=0$$
$$A_1\xi_1\sinh\xi_1\alpha+B_1\xi_1\cosh\xi_1\alpha-C_1\eta_1\sin\eta_1\propto+E_1\eta_1\cos\eta_1\propto=0$$
$$A_2\cosh\xi_2\beta-B_2\sinh\xi_2\beta+C_2\cos\eta_2\beta-E_2\sin\eta_2\beta=0$$
$$A_2\xi_2\sinh\xi_2\beta-B_2\xi_2\cosh\xi_2\beta-C_2\eta_2\sin\eta_2\beta-E_2\eta_2\cos\eta_2\beta=0,$$

где

$$a_i=\xi_i^2+(\lambda+1)(\nu_{ri}+1),\ b_i=\eta_i^2-(\lambda+1)(\nu_{ri}+1)$$
$$p_i=(\xi_i^2+\lambda+1)D_{\theta i}+\lambda[(\lambda+1)D_{r\theta i}+2(\lambda-1)D_{ki}]$$
$$q_i=(\eta_i^2-\lambda-1)D_{\theta i}-\lambda[(\lambda+1)D_{r\theta i}+2(\lambda-1)D_{ki}]$$

Для существования нетривиального решения однородных систем (11), (12) и (13) линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_i, B_i, C_i, E_i необходимо, чтобы определители этих систем равнялись нулю

$$\Delta(\lambda,\alpha,\beta,\nu_{ri},\nu_{\theta i},E_{ri},E_{\theta i},G_i)=0 \quad (14)$$

Из (2) и (6) следует, что если $0<\mathrm{Re}\lambda_1<1$, то при приближении к краю поверхности соединения ($r\to 0$) напряжения (моменты) неограниченно возрастают, при этом порядок особенности равен $|\mathrm{Re}\lambda_1-1|$. А если $\mathrm{Re}\lambda_1>1$, напряжения убывают до нуля при приближении к вершине угла.

Результаты исследования. Таким образом, исследование характера напряженного состояния в окрестности ребра края поверхности соединения составной анизотропной пластины при изгибе приводится к отысканию корня λ трансцендентного уравнения (14) с наименьшей положительной частью для фиксированных углов и механических характеристик соединяемых материалов.

Приравнивая нулю определители этих новых систем, получаем уравнения относительно λ для каждого из трех случаев соответственно. Проведено численное решение этих уравнений для следующих групп параметров:

$$1)\ \gamma=1, G_i=\mu_i;\ 2)\gamma=1, G_i=4\mu_i;\ 3)\ \gamma=1, G_i=\mu_i/4;$$
$$4)\ \gamma=1/2, G_i=\mu_i;\ 5)\ \gamma=1/2, G_i=4\mu_i;\ 6)\ \gamma=2, G_i=4\mu_i.$$

В численных расчетах везде учтено замечание Фойгта [6] о равенстве $E_{ri}=E_{\theta i}$.

Некоторые результаты численного исследования корня λ, в зависимости от угла $\varphi=\propto+\beta$, приведены в таблице где $\propto=10^0$.

Таблица 1

Значения параметра λ в зависимости от углов $\propto$ и β

φ	1	2	3	4	5	6
140	1,533	0,845	2,34	1,574	0,784	0,88
160	1,288	0,703	1,72	1,146	0,653	0,73
180	1,000	0,596	1,51	0,910	0,556	0,61
200	0,816	0,516	1,039	0,756	0,485	0,53
230	0,652	0,436	0,817	0,614	0,416	0,447
290	0,519	0,373	0,60	0,508	0,367	0,375
360	0,500	0,325	0,563	0,474	0,311	0,333

Таблица показывает, что для данных углов, в зависимости от параметров анизотропии, может быть концентрация напряжений в вершине или не быть.

Можем решить и обратную задачу [1–5]. Построим кривые, которые при фиксированных значениях механических характеристик материалов на плоскости $\propto\beta$ разделяют области конечных и бесконечных напряжений (моментов). Предполагая, что вблизи границы области высокой концентрации напряжений наименьший корень уравнения (11) действительный, положим в этом уравнении $\lambda=1$ (предварительно освобождаясь от двукратного корня $\lambda=1$) и найдем наименьшие положительные значения углов $\propto$ и β в зависимости от параметров анизотропии. Геометрические места этих точек в плоскости $\propto\beta$ образуют те предельные кривые, которые разделяют концентрационную область (выше кривых) от областей малонапряженности (ниже кривых). Численная реализация полученного уравнения позволяет в пространстве параметров $\alpha, \beta, \nu_{ri}, \nu_{\theta i}, E_{ri}, E_{\theta i}, G_i$ определить зону малонапряженности для края, обеспечивающую прочность соединения.

На рис. 2 показаны эти кривые для различных значений параметров анизотропии. Линии 1–9 отвечают следующим параметрам: 1) $\gamma = 1, G_i = \mu_i$; 2) $\gamma = 1/2, G_i = \mu_i$; 3) $\gamma = 2, G_i = \mu_i$; 4) $\gamma = 1, G_i = 4\mu_i$; 5) $\gamma = 1/2, G_i = 4\mu_i$; 6) $\gamma = 2, G_i = \mu_i$; 7) $\gamma = 1, G_i = \mu_i/4$; 8) $\gamma = 1/2, G_i = \mu_i/4$; 9) $\gamma = 2, G_i = \mu_i/4$.

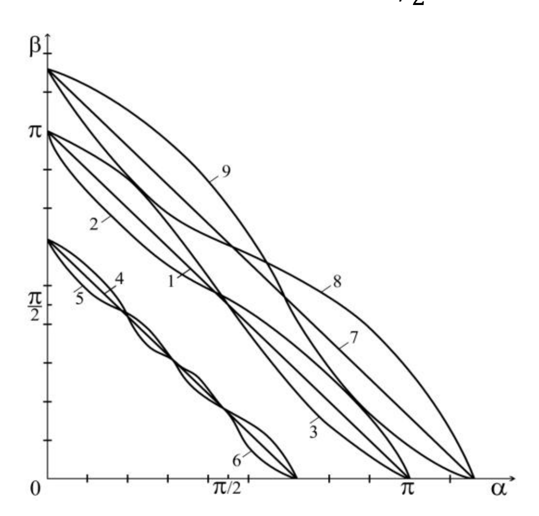


Рис. 2. Распределение зон малонапряженности

На графиках прямые линии соответствуют однородной пластине, а кривые — составной.

Обсуждение и заключения. Если для однородной изотропной пластины с углом раствора больше π всегда имеется концентрация напряжений в вершине, а с углом меньше π отсутствует, то для однородной анизотропной пластины, а также составной изотропной и анизотропной пластин, как показывают графики на рис. 2, эта закономерность нарушается.

Видно, что степень концентрации перерезывающих сил вблизи угловой точки на единицу выше, по сравнению с моментами, что объясняется несовершенством классической теории изгиба пластин.

Аналогичным образом можно рассматривать граничные условия, когда плита свободно оперта по внешним краям, внешние края свободны, а также смешанные краевые условия.

Рассмотренную здесь задачу можно также исследовать, используя уточненную теорию изгиба анизотропных пластин [12, 13], позволяющую уйти от ограничений, налагаемых аппроксимацией Кирхгофа, и сравнить результаты.

Библиографический список

1. Чобанян, К. С. Напряжения в составных упругих телах / К. С. Чобанян. — Ереван : Изд-во АН Арм. ССР, 1987. — 338 с.

2. Задоян, М. А. Об условиях малонапряженности составных пластин / М. А. Задоян // Доклады РАН. — 1993. — Т. 33. — №3. — С. 319–321.

3. Акопян, А. Г. Малонапряженное состояние неоднородно-составных клиньев при смешанных граничных условиях / А. Г. Акопян // Прикладная механика и техническая физика. — 1994. — № 3. — С. 149–156.

4. Акопян, А. Г. О плоской деформации малонапряженного неоднородно-составного клина / А. Г. Акопян // Известия национальной академии наук Армении. Механика. — 1994. — №5–6. — С. 42–48.

5. Акопян, А. Г. Малонапряженность неоднородно-составных клиньев / А. Г. Акопян, М. А. Задоян // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 1992. — №5. — С.88–96.

6. Лехницкий, С. Г. Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. — Москва : Гостехиздат, 1957. — 463 с.

7. Chyanbin Hwu Anisotropic Elastic Plates / Springer Science & Business Media. — 2010. — 673 p.

8. Williams, M. L. Surface Stress Singularities Resulting from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates under Bending / M. L. Williams // Proceedings of the First U.S. National Congress of Applied Mechanics. — 1950. — P. 325–329.

9. Burton, W. S. On the Singularities in Reissner`s Theory for the Bending of Elastic Plates / W. S. Burton and G.B. Sinclair // Journal of Applied Mechanics. — 1986. — Vol. 53, no. 1. — P. 220–222.

10. Геворкян, Г. В. Экспериментальные исследования прочности составных пластин при изгибе / Г. В. Геворкян [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. — 2000. — Т. 41, № 4. — С. 763–767.

11. Задоян, М. А. О прочности соединения составной плиты / М. А. Задоян // Известия Национальной Академии наук РА и Государственного инженерного университета Армении. Серия «Технические науки». — 2000. — Т. LIII, № 1. — С. 8–11.

12. Vijayakumar, K. A relook Reissner`s theory of plate in bending / K. Vijayakumar // Archive of applied mechanic. — 2011. — Vol. 81, no.11. — P. 1717–1724.

13. Амбарцумян, С. А. Теория анизотропных пластин / С. А. Амбарцумян. — Москва : Наука, 1967. — 360 с.

Сдана в редакцию 11.09.2019
Принята к публикации 07.11.2019

Об авторе:

Акопян Ашот Гаврошович,
доцент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) Северо-Кавказский филиал, (РФ 357340, Ставропольский край, г. Лермонтов, ул. Промышленная 20), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2921-5334
manakofoto@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 678.549 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-310-316

Влияние волнового эффекта на предел прочности волокна при испытаниях композитного материала на растяжение*

И. Р. Антибас[1], Амер Карнуб[2], А. Г. Дьяченко[3]**
[1,3]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]ETH Zurich, Цюрих, Швейцария

Influence of wave effect on fiber stress limit under tensile tests of composite material ***

I. R. Antypas[1], Amer Karnoub[2], A.G. Dyachenko[3]**
[1,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]ETH Zurich, Zurich, Switzerland

Введение. Реакция композиционных материалов на воздействие определённого рода нагрузок трудно прогнозируема, поэтому исследованиям в этой области не уделялось должного внимания. Целью настоящей работы было изучение влияния волнового эффекта на предел прочности при растяжении полимерных композитов волокнистой структуры.
Материалы и методы. В испытаниях использовались образцы многослойных материалов различной толщины с непрерывными, длинными и короткими волокнами, образующими ткань, а также слоистую структуру. Число слоев соответствует сопротивляемости приложенным нагрузкам. Применялись волокна стекла, углерода, кевлара или их комбинации. В качестве связующих использовали изотропные материалы: эпоксид, полиэфир и виниловый эфир.
Результаты исследования: Получены результаты испытания на растяжение гомогенных образцов и образцов волокнистой структуры. При этом варьировались значения угла наклона волокон. Установлена стабильность результатов испытания путем их взаимного сравнения. Получена зависимость максимальных напряжений при растяжении σ_{max}, МПа, (на вертикальной оси) от угла наклона волокна θ_{max}. Эти напряжения для материала с безволновыми волокнами составили 250 МПа. Рассчитаны нормальные и касательные напряжения, действующие перпендикулярно волокнам, а также напряжения слоистого материала при сдвиге. В результате анализа зависимостей для характерных напряжений при растяжении и исследования рефракции в сечении разрушения образцов установлено, что причиной разрушения является напряжение сдвига τ_{xy}. С помощью уравнения, которое позволяет компенсировать угол наклона $\theta = 45°$, было определено, что значение напряжения сдвига полиэстера $\tau_{xy} = 35$ МПа. Это и есть напряжение, которое впоследствии явилось причиной разрушения образцов.
Обсуждение и заключения: Напряжения при растяжении

Introduction. The response of composite materials to the impact of a certain kind of load is difficult to predict, therefore, research in this area has often been neglected. The work objective was to study the influence of the wave effect on the tensile strength of polymer composites of a fibrous structure.
Materials and Methods. In the tests, samples of multilayer materials of various thicknesses with continuous, long and short fibers that form a fabric, as well as a layered structure, were used. The number of layers corresponds to the resistance to the applied loads. Fibers of glass, carbon, kevlar, or their combinations were used. Isotropic materials – epoxide, polyester and vinyl ether – were used as binders.
Research Results. The tensile test results of homogeneous samples and samples of fibrous structure are obtained. In this case, the values of fiber angle varied. The stability of their intercomparison test results is established. The dependence of the maximum tensile stresses σ_{max}, MPa, (on the vertical axis) on the fiber angle θ_{max} is obtained. These stresses for a fibreless material amounted to 250 MPa. Normal and tangential stresses acting perpendicular to the fibers, as well as shear stresses of the layered material, are calculated. As follows from the analysis of the dependences for the significant tensile stresses and from the study on refraction in the section of the sample damage, it was established that the shear stress τ_{xy} was the cause of the fracture. Using an equation providing the compensation for the angle of inclination θ = 45, it was determined that the shear stress of the polyester is τ_{xy} = 35 MPa. This was the stress that caused subsequently the destruction of the samples.
Discussion and Conclusions. The tensile stresses of the com-



* Работа выполнено в рамках инициативной НИР.
** E-mail: imad.antypas@mail.ru, amerkarnoub@gmail.com, alexey-a2@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

композитного материала уменьшаются с увеличением угла наклона волокон в определенных зонах. Разрушение всех образцов волокна наступало тогда, когда величина напряжения сдвига достигала значения, примерно равного величине напряжения сдвига, при котором происходило разрушение образцов, изготовленных только из связующего материала. При разрыве образца форма разрушения имела вид, аналогичный разрушению при сдвиге, причём в момент разрушения объект, имеющий прямоугольную форму, деформируясь под углом, принимал форму параллелограмма.

Ключевые слова: композитный материал, связующий материал, волокнистый материал, наполнитель, дефект структуры.

Образец для цитирования: Влияние волнового эффекта на предел прочности волокна при испытаниях композитного материала на растяжение И. Р. Антибас [и др.] Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 310−316. https://doi.org/ 10.23947/1992-5980-2019-19-4-310-316

posite material decrease with increasing the fiber angle in certain areas. The destruction of all fiber samples occurred when the shear stress reached a value approximately equal to the shear stress at which the destruction of samples made only from a binder material happened. When the specimen broke, the fracture mode had the form similar to the shear failure; besides, at the moment of fracture, the object having a rectangular shape, being deformed at an angle, took the form of a parallelogram.

Keywords: composite material, binding material, fibrous material, filler, structure defect.

For citation: I.R. Antypas, et al. Influence of wave effect on fiber stress limit under tensile tests of composite material. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 310−316. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-310-316

Введение. В исследованиях применялись композитные материалы, широко используемые в строительстве. Использовались образцы различной толщины из многослойных материалов, содержащие непрерывные, длинные, короткие волокна и волокна, образующие ткань. Количество слоев наполнителя соответствовало сопротивляемости приложенным нагрузкам. Использовались волокна из стекла, углерода, кевлара или их комбинации в сочетании со связующими. Связующие материалы предназначены для развития адгезионной связи между волокнами, защиты их от окружающей среды и распределения нагрузки. В качестве связующих применялись изотропные материалы, такие как эпоксид, полиэстер и виниловый эфир [1].

Себестоимость изделий из полимерных композитов в основном зависит от стоимости ингредиентов и количества технологических этапов изготовления. Нарушения технологических регламентов приводит к отклонениям от требуемой структуры материала, образованию разного рода дефектов, в том числе реализуется волнистая форма волокон (рис. 1), нарушается однородность гетерогенной структуры. Все это приводит к ухудшению комплекса физико-механических свойств композита [2].

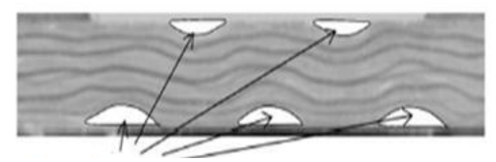


Рис. 1. Нарушения структуры композита в виде волнистой ориентации наполнителя и локальной концентрации связующего

Многие недостатки армированных композитов в большой степени связаны с наличием примесей и раковин в изделии. Раковины образуются в процессе отверждения связующего, которое изначально находясь в вязко-текучем состоянии транслировало газовые включения в виде пузырьков в объем композита в процессе свободной заливки формы. Неоднородность концентрации волокон и связующего в объеме материала возникает из-за наличия функциональных добавок или дополнительного наполнителя, например, песка (рис. 2).

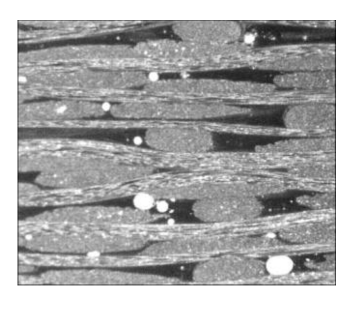
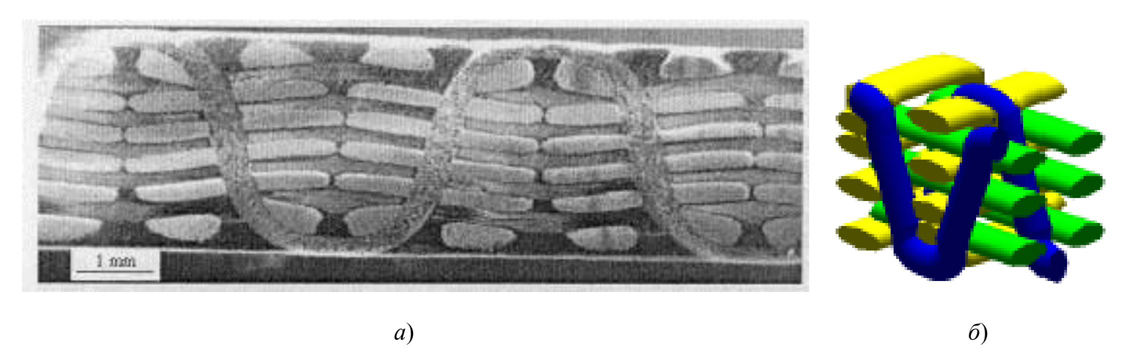


Рис. 2. Сечение композитного материала, содержащего пузырьки

На рис. 3 показано, что волновая ориентация волокон может располагаться в плоскости ткани, по структуре аналогичной фиброзной, а также в плоскости сплетенных волокон. Эти волокна обеспечивают стабильность структуры при транспортировке, обработке, а также облегчают технологическую проницаемость слоёв композитных материалов. Это позволяет соединять волокна в группы продольно или перпендикулярно друг к другу [3], что не препятствует образованию небольших волн в ткани.



а) *б*)

Рис. 3. Волновая ориентация волокон в плоскости слоя:
а — разрез композита; *б* — пространственная структура

Пространственные волновые структуры (рис. 4) реализуют с помощью текстильного оборудования. Эти структуры способны принимать конечную форму продукта, изготовленного из композитного материала. Затем такую структуру пропитывают связующим и формуют изделие одним из известных способов.

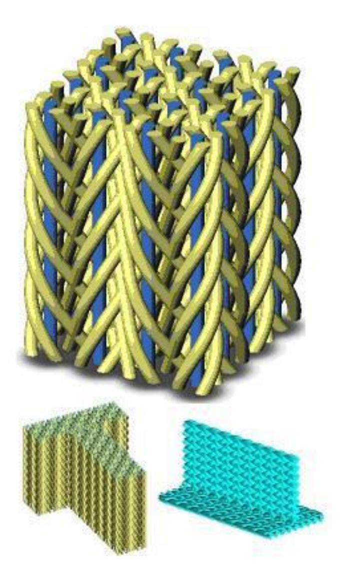
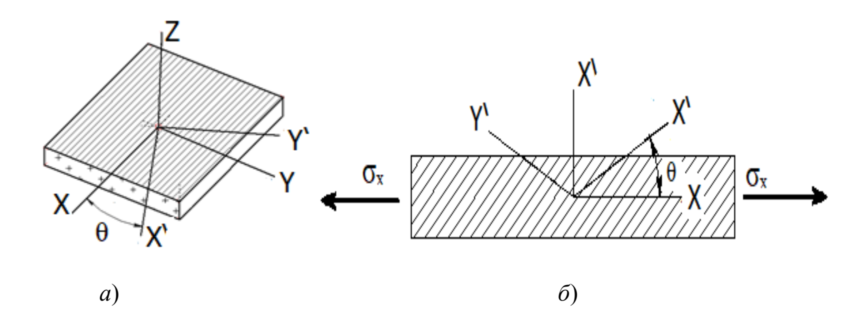


Рис. 4. Образцы волоконных структур трехмерного плетения

В [4, 5] описывается метод испытаний пространственных волоконных конструкций с различными компонентами и при наличии дефектов. Образование волновой конфигурации волокон в таких материалах может оказывать как отрицательное, так и позитивное влияние на свойства композитных материалов. В [6] проводится теоретический и практический поиск нелинейного поведения композитных материалов, армированных однонаправленными волокнами, в которых наблюдаются волны, возникающие под действием растягивающих нагрузок и давления.

Цель исследования. Целью данного исследования является изучение влияния волн на предел прочности при растяжении композитного материала, состоящего из полиэстера и стекловолокна, проведение анализа возникающих напряжений и изучение разрушения образца вследствие различных факторов.

Аналитическое исследование. Композитный материал с длинноволокнистым наполнителем может выдержать большую нагрузку, действующую вдоль волокон, что следует из рис. 5, *а*. Однако нагрузка, не соответствующая направлению волокон, распределяется между ними и связующим. Эта нагрузка зависит от угла между направлением ее действия и направлением ориентации волокон. Для определения напряжений, действующих перпендикулярно к волокну и вдоль него, авторы использовали координаты, получаемые поворотом общих координат x-y-z на угол θ вокруг оси z [7] (рис. 5, *б*).



а) *б*)

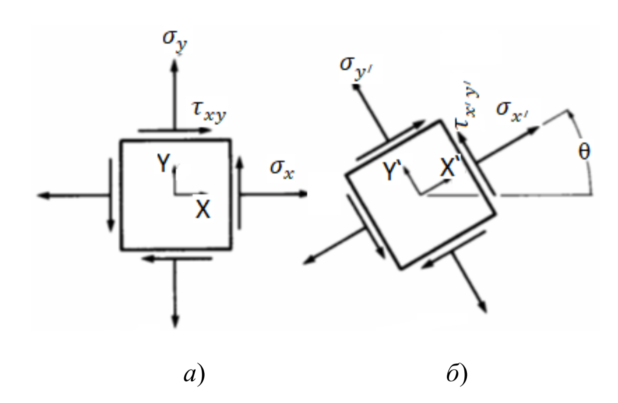
Рис. 5. Координаты пластин материалов: *а* — с прямыми волокнами, *б* — с волокнами под углом

Если бесконечно малый объемный элемент (рис. 6, *а*) извлечь из общих координат и повернуть на угол θ, то, используя уравнения (1), (2) и (3), можно определить нормальные и касательные напряжения, развиваемые в новом положении (рис. 6, *б*) [8]:

$$\sigma_{x^/} = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta, \quad (1)$$

$$\tau_{x^/y^/} = -\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta, \quad (2)$$

$$\sigma_{y^/} = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta. \quad (3)$$



а) *б*)

Рис. 6. Напряжения, развиваемые в элементе бесконечно малого объёма:

а — в общей системе координат, *б* — в системе координат под углом

В случае волновой конфигурации волокон напряженное состояние материала наиболее опасно при максимальном значении угла (θ_{max}), так как нормальные напряжения ориентируются перпендикулярно слою армирующего наполнителя. Если рассмотреть бесконечно малый элемент в таком состоянии (рис. 7), то, вычислив значения напряжений из уравнений (1), (2), (3) и сравнив их значения, можно установить причины разрушения образца.

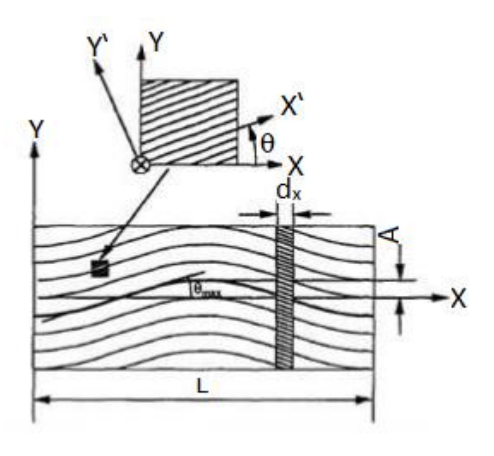


Рис. 7. Бесконечно малый объёмный элемент при максимальном значении угла наклона волокна (θ_{max})

Материалы и методы исследования. Изучалось влияние волнового эффекта на предел прочности при растяжении в соответствии со стандартом *ASTM D* 638-90 [9]. Испытанию подвергались образцы листовой формы из полимерных композитов, содержащих армирующий наполнитель (стекловолокно) и связующее (полиэстер), содержание отвердителя составляло 2 % от общего объёма. Образцы изготавливали методом свободного формования [10], при этом использован шаблон, состоящий из стеклянных пластин с размерами 38×25×6 мм, который вмещал 10 слоев стекловолокна, а в качестве буфера для предотвращения адгезии применяли прослойки из целлофана. В процессе формования использовали небольшую вибрацию в течение пяти минут. Выдержка для отверждения в форме — 24 ч. Выдержка для стабилизации структуры и свойств образцов в свободном состоянии перед испытаниями — 25 суток. С помощью специальных плат были изготовлены образцы без волнистости и с волновой ориентацией наполнителя. Причем последние отличались друг от друга по амплитуде волн. На рис. 8 показано образование волн в одиночной плате.



Рис. 8. Образование волн в одиночной плате

Результаты и обсуждение. Проведены испытания на растяжение образцов с волокнами без волнистости и с волокнами, имеющими синусоидальную форму полуволны, при углах их наклона: $\theta_{макс} = 10°$, 18°, 22°, 28° и 38°. Установлена стабильность результатов испытания путем их взаимного сравнения для образцов без волнистости наполнителя, изготовленных на пяти различных платах. На рис. 9 показана кривая изменения напряжений при растяжении с изменением угла наклона волокна. При этом напряжения при растяжении σ_{max} для материала с безволновыми волокнами составили 250 МПа.

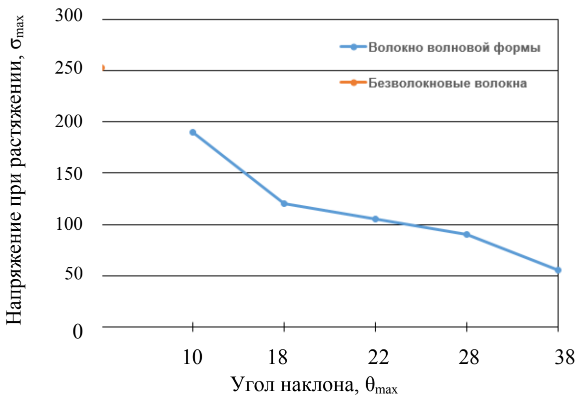


Рис. 9. Зависимость максимальных напряжений при растяжении σ_{max}, МПа, (на вертикальной оси) от угла наклона волокна θ_{max}

Используя уравнения (1) и (3) рассчитаны нормальные и касательные напряжения, действующие перпендикулярно волокнам, а также напряжения слоистого материала при сдвиге по уравнению (2).

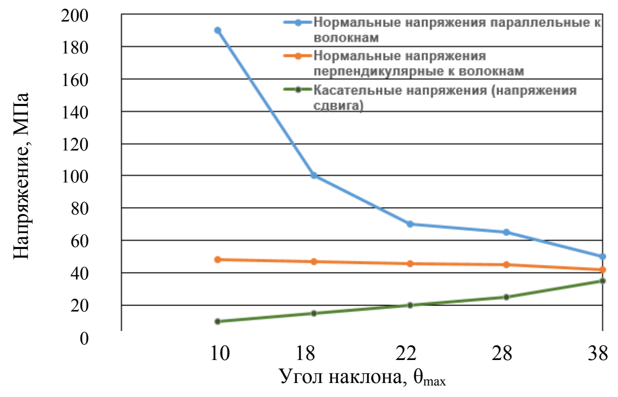


Рис. 10. Кривые зависимостей характерных напряжений от угла наклона волны θ_{max}

В результате анализа зависимостей для характерных напряжений при растяжении в координатах точки с углом наклона волокна θ_{max} и исследования сечения в месте разрушения образцов (рис. 11) установлено, что причиной разрушения является напряжение сдвига τ_{xy}. Сравнение этого напряжения с максимальным напряжением при сдвиге образца из полиэстера без волокон приведены в [10]. При этом предел текучести ($\sigma_т$) был принят равным 70 МПа. С помощью уравнения (2), которое позволяет компенсировать угол наклона $\theta = 45°$, нашли, что значение напряжения сдвига полиэстера $\tau_{xy} = 35$ МПа. Это и есть напряжение, которое впоследствии явилось причиной разрушения всех образцов. Уравнение (2) позволяет определить деформацию образцов в точке разрыва, а также даёт отображение деформаций и угловых смещений, доказывающих, что разрушение слоистого материала является следствием напряжений сдвига.



Рис. 11. Рефракция в сечении разрушения

Заключение. Исходя из результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1. Напряжения при растяжении композитного материала уменьшаются с увеличением угла наклона волокон в определенных зонах. Полученный результат показал совпадение с исследованиями, проведёнными ранее [11, 12].

2. Установлено, что разрушение всех волокнистых образцов происходило при достижении напряжения сдвига, примерно равного напряжению сдвига, при котором разрушались образцы, изготовленные только из связующего. Это согласуется с [13, 14], данные различались лишь в отношении напряжений, развивающихся в связующем материале.

3. При разрыве образца форма разрушения имеет вид, аналогичный разрушению при сдвиге, причём в момент разрушения прямоугольный объект, деформируясь под углом, принимал форму параллелограмма.

4. Рекомендуется продолжить исследования в данной области, основными целями которых должны быть изучение влияния меньших углов пульсации волокна на предел прочности на разрыв композитного материала, а также изучение влияния волнового эффекта на коэффициент гибкости.

Библиографический список

1. Bacarreza**,** O. Woven Composites/ O. Bacarreza, P. Wen, and M.H. Aliabadi, in: M. H. Aliabadi (ed.) // Computational and Experimental Methods in Structures. — 2015. — Vol. 6, Ch. 1. — P. 1–74.

2. Sendeckyj, G.P. Effects of Defects in Composite Structures. In: A.K. Noor, M.J. Shuart, J.H. Strarnes Jr., J.G. Williams, eds. Failure Analysis and Mechanisms of Failure of Fibrous Composite Structures. NASA Conf. Pub., 1983, vol. 2278, pp. 305-312.

3. Textile composites and inflatable structures /E. Oñate, B.-H. Kröplin (Eds.). — 2005. — Vol. 3. — P. 322.

4. Potter, K. Variability, Fibre Waviness and Misalignment in the Determination of the Properties of composite Materials and Structures / K. Potter, B. Khan, M.Wisnom, T.Bell, J. Stevens // Composites Part A. — 2008. — Vol. 39. — P. 1343–1354.

5. Kharmanda, G. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns / G. Kharmanda, I. R. Antypas // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на Дону, 2017. — С. 174–176.

6. Isa, M.T. Effect of fiber type and combinations on the mechanical / M. T. Isa, A. S. Ahmed, B. O. Aderemi, R. M. Taib, and I. A. Mohammed-dabo // Physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites. — 2013. — Part B. — No. 52, — P. 217–223.

7. Ronald F. Gibson. Principles of Composite Material Mechanics/ Ronald F. Gibson // International Editions. — 1994. — McGraw-Hill Inc. — P. 7.

8. Антибас, И. Р. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 8-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й междунар. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на Дону, 2015. — С. 232–235.

9. Антибас, И. Р Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 3(90). — С. 60–69.

10. Антибас, И. Р Влияние содержания древесного дисперсного наполнителя на долговечность композиционных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 1(88). — С. 67–74.

11. Karami, G. Finite Element Micromechanics for Stiffness and Strength of Wavy Fibre Composites / G. Karami, M. Garnich // Journal of Composite Materials. — 2004. — Vol. 38. — P. 273–292.

12. Chan, W.S. Influence of Fibre Waviness on the Structural Response off Composite Laminates / W.S. Chan, J.S. Wang // Journal of Thermoplastic Composite materials. — 1994. — Vol. 7. — P. 243–369.

13. Travis, A. Influence of Ply Waviness on the Stiffness and Strength Reduction on Composite Laminates / A. Travis, I. Bogett, W. John Jr., A. Gillespie // Journal of Thermoplastic Composite Materials. — 1992. — Vol. 5. — P. 344.

14. Garnich, Mark R. Localized Fibre Waviness and Implications for Failure in Unidirectional Composites / Mark R. Garnich and Ghodrat Karami // Journal of composite Materials. — 2005. — Vol. 39. — P. 1225–1245.

Сдана в редакцию 17.09.2019
Принята к публикации 08.11.2019

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
Imad.antypas@mail.ru

Дьяченко Алексей Геннадьевич,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9934-4193
alexey-a2@mail.ru

Amer Karnouba,
guest researcher of the Department of Materials, Laboratory of Physics and Technology, ETH Zurich (8093 Zurich, Switzerland),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9824-7364
amerkarnoub@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-83 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-317-327

Теоретические основы моделирования динамических характеристик приводов перспективных космических аппаратов с учетом функционирования осцилляторов*

А. Н. Сова[1], М. И. Степанов[2], В. А. Сова[3], А. И. Быков[4]**
[1, 2] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация
[3] Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
[4] Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина, Химки, Российская Федерация

Background for modeling the dynamic characteristics of advanced spacecraft drives considering the operation of oscillators***

A. N. Sova[1], M. I. Stepanov[2], V. A. Sova[3], A. I. Bykov[4]**
[1, 2] Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation
[3] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
[4] Lavochkin Association, Khimki, Russian Federation

Введение. В рамках данного исследования рассмотрены прецизионные элементы целевой аппаратуры и чувствительные элементы системы стабилизации и ориентации перспективных космических аппаратов. Обоснованы и разработаны метод и программно-алгоритмическое обеспечение моделирования динамических характеристик указанных элементов. При этом учтены результаты обработки данных по экспериментальным исследованиям активных и пассивных осцилляторов.
Материалы и методы. Показано, как метод обезвешивания позволяет воссоздать условия, максимально соответствующие реальной эксплуатации перспективных космических аппаратов, прецизионных элементов конструкции, целевой аппаратуры и их приводов. Представлены схемы соответствующих экспериментальных установок. Использованы методы математического моделирования, методы механики и динамики машин. Рассчитаны основные параметры динамики предлагаемой конструкции — определяющие с точки зрения реализации целевых функций космического аппарата. Сформированы рациональные варианты компоновки и примерных циклограмм функционирования перспективных космических аппаратов с целью снижения микровозмущений от приводных устройств с вращающимися массами.
Результаты исследования. Обоснован и разработан метод моделирования динамических характеристик приводов перспективных космических аппаратов с учетом функционирования штатных осцилляторов. Представлен комплекс методик решения проблем идентификации динамических параметров математической модели перспективных космических аппаратов с учетом результатов обработки данных, получаемых при экспериментальной отработке активных и пассивных осцилляторов. Отмечены два вида вибрации от двигателей маховиков. Первый: по ко-

Introduction. Precision elements of the target equipment and sensitive elements of the stabilization and orientation system of the advanced spacecraft are considered in the framework of this research. A method and software for modeling the dynamic characteristics of these elements are developed and validated. At that, the processing data results from the experimental studies on active and passive oscillators are taken into account.
Materials and Methods. It is shown how the method of weightlessness provides simulation of the conditions that as much as possible conform to the real-time use of advanced space vehicles, precision structural elements, target equipment and their drives. Schemes of the corresponding experimental facilities are presented. Mathematical modeling methods, techniques of machine mechanics and dynamics are applied. Basic parameters of the proposed design dynamics, which are governing parameters in terms of the implementation of the target functions of the spacecraft, are calculated. Rational versions of layout and approximate cycle patterns of the operation of advanced space vehicles are formed to reduce microperturbations from driving gear with rotating masses.
Research Results. A simulation technique for the dynamic characteristics of the drives of advanced space vehicles considering the regular oscillator operation is developed and validated. A complex of methods is presented for solving the problems of identifying dynamic parameters of a mathematical model of an advanced spacecraft based on the processing data results obtained through the experimental testing of active and passive oscillators. Two types of vibration from flywheel engines are noted. The first type is according to the commands of



* Исследование выполнено в рамках инициативной НИР.
** E-mail: slsova@mail.ru, madi.1965@mail.ru, vladislavsovaa@gmail.com, bykovartem1994@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

мандам системы управления ориентацией и стабилизацией. Второй: обусловленный остаточным дисбалансом, от измерителя солнечной постоянной. Показано, каким образом эти вибрации влияют на динамические характеристики посадочных мест гироскопического измерителя вектора угловой скорости и многозонального сканирующего устройства гидрометеорологического обеспечения космического аппарата. Полученные данные предназначены для решения задач обеспечения динамической точности перспективных космических аппаратов.
Обсуждение и заключения. Предложен метод моделирования динамических характеристик перспективных космических аппаратов при функционировании в режиме прецизионной ориентации. Решение основано на представленных в статье результатах теоретико-экспериментальных исследований и учитывает работу штатных осцилляторов. Реализация указанного метода доведена до программно-алгоритмического обеспечения оценки динамических характеристик штатных осцилляторов перспективного космического аппарата. Обоснованы рекомендации по снижению влияния активных осцилляторов. Выбраны исходные данные для определения динамики перспективных космических аппаратов с точки зрения выполнения их целевых функций. Предложены компоновка и примерные циклограммы функционирования перспективного космического аппарата с целью выявления приводных устройств с вращающимися массами как источников микровозмущений.

the position control and stabilization control system. The second type is due to residual imbalance from the solar constant meter. It is shown how these vibrations affect the dynamic characteristics of the gyro mounting seats and of the multispectral scanner for hydrometeorological support of the spacecraft. The data obtained are meant to solve the problems of assurance of the dynamic accuracy of advanced space vehicles.
Discussion and Conclusions. A technique for modeling the dynamic characteristics of advanced space vehicles when operating in the precision orientation mode is proposed. The solution is based on the results of theoretical and experimental studies presented in the paper, and it considers the operation of standard oscillators. The implementation of this method is brought to software and algorithmic support for assessing the dynamic characteristics of standard oscillators of an advanced space vehicle. Recommendations to reduce the effect of active oscillators are established. Initial data are selected to determine the dynamics of advanced space vehicles from the point of view of fulfilling their target functions. The layout and approximate cycle patterns of the operation of advanced space vehicles to identify the driving gear with rotating masses as sources of micro-perturbations are proposed.

Ключевые слова: амплитуда колебаний, декремент затухания колебаний, динамическая точность, космический аппарат, математическое моделирование, метод, микровозмущение, перемещение, прецизионная стабилизация, привод, программно-алгоритмическое обеспечение, скорость, ускорение, частота колебаний.

Keywords: amplitude of oscillations, damping ratio, dynamic accuracy, spacecraft, mathematical simulation, method, microperturbation, displacement, precision stabilization, drive, software and algorithmic support, velocity, acceleration, oscillation frequency.

Образец для цитирования: Теоретические основы моделирования динамических характеристик приводов перспективных космических аппаратов с учетом функционирования осцилляторов / А. Н. Сова [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 317−327. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-317-327

For citation: A.N. Sova, et al. Background for modeling the dynamic characteristics of advanced spacecraft drives considering the operation of oscillators. Vestnik of DGTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 317−327. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-317-327

Введение. На современном этапе развития авиакосмической отрасли сохраняют актуальность практические задачи обеспечения динамической точности угловых и линейных перемещений прецизионных элементов конструкции (ПЭК) и целевой аппаратуры (ЦА) перспективных космических аппаратов (КА) при действии внутренних источников возмущений. Такими источниками считаются устройства, приборы и приводы космического аппарата и научной аппаратуры. Движущиеся и вращающиеся массы указанного оборудования в режимах прецизионного наведения формируют вибрационные возмущения [1, 2]. В ходе теоретико-экспериментальных исследований решен комплекс перечисленных ниже частных задач исследования [3, 4].

1) Анализ требований, предъявляемых к современным космическим аппаратам с прецизионной стабилизацией, в зависимости от их назначения и устанавливаемой на них научной аппаратуры. Цель — унификация этих требований.

2) Классификация и анализ основных источников внутренних возмущений. Цель — определение наиболее виброактивных и выявление возможности ослабления и (или) исключения их воздействия.

3) Обоснование и разработка экспериментальных методов и средств определения микровозмущений, а также методов их математического моделирования.

4) Проведение экспериментов по определению диссипативных свойств конструкций космических аппаратов при малых уровнях перемещений (порядка 0,5 мкм).

5) Обоснование и разработка достаточно точных математических моделей космических аппаратов и

научной аппаратуры для анализа динамической точности как в низкочастотной, так и в среднечастотной областях возмущений.

6) Обоснование и разработка методов математического моделирования для исследования динамической точности с учетом экспериментально определяемых параметров возмущений.

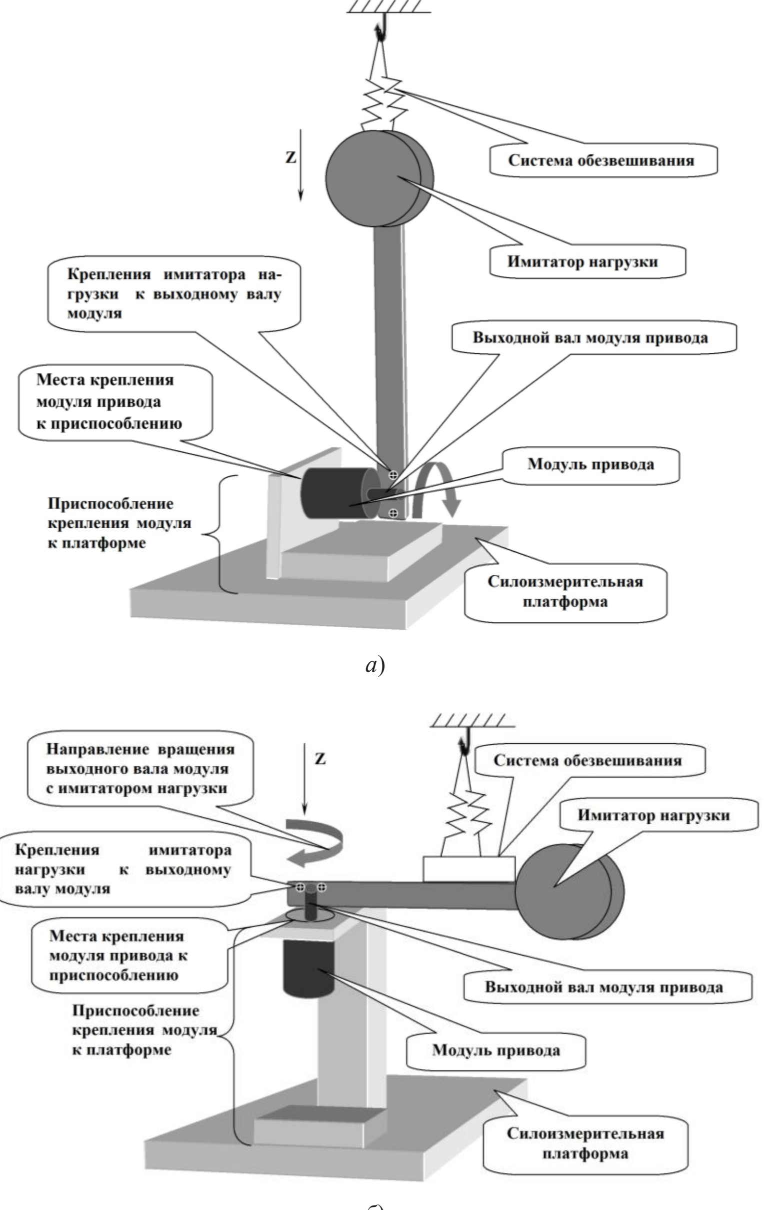
7) Анализ результатов исследования динамической точности и общих требований к ее параметрам для перспективного космического аппарата, включая ЦА. Обоснование и разработка на основе этого анализа частных требований по виброактивности основных источников внутренних возмущений.

Материалы и методы

Постановка задачи исследования. Предложены схемы экспериментальных установок, реализация которых с применением метода обезвешивания позволяет воссоздать условия, максимально соответствующие реальной эксплуатации перспективных КА, ПЭК, ЦА и их приводов [3–5]. Математическое моделирование и эксперименты позволили обосновать и разработать предложения по коррекции динамических характеристик ПЭК и ЦА перспективных КА при действии внутренних источников возмущений.

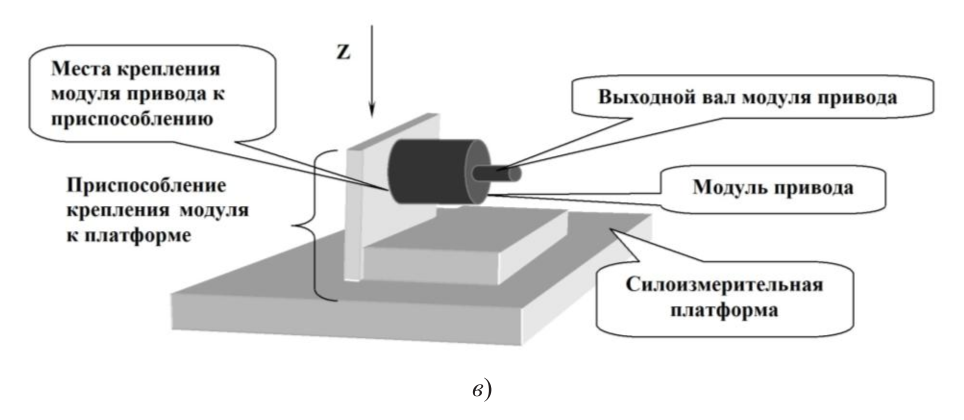
Методы решения задачи исследования. Для решения задач исследования использованы методы математического моделирования, методы механики и динамики машин. Предложены: метод моделирования динамических характеристик перспективных КА при функционировании в режиме прецизионной ориентации с учетом работы штатных осцилляторов и метод обработки результатов экспериментальных исследований микровозмущений.

Описание схем экспериментальных установок. Для решения указанных задач реализованы схемы проведения экспериментальных исследований (рис. 1).



а)

б)



в)

Рис. 1. Схемы проведения эксперимента на силовом испытательном стенде с нагрузкой на выходном валу модуля привода: горизонтальная ось вращения (*а*); вертикальная ось вращения (*б*); нагрузка на выходном валу J = 4,75 кгм^2 (*в*)

Экспериментальные исследования по выбранным схемам позволили оценить влияние гравитации и системы обезвешивания на полезный сигнал [5–8].

Результаты исследования

Метод моделирования динамических характеристик приводов перспективных космических аппаратов с учетом функционирования штатных осцилляторов. Для обеспечения динамической точности принят представленный на рис. 2 порядок проведения исследований [8–11].



Рис. 2. Порядок проведения исследований, принятый при отработке динамической точности

Кроме того, экспериментально исследованы микровозмущения физических натурных моделей перспективных КА. При анализе информации, получаемой при экспериментальной отработке активных и пассивных осцилляторов, возникают проблемы идентификации динамических параметров математической модели изделия. В данной статье представлены пути и методы решения этих проблем.

Метод обработки результатов экспериментальных исследований микровозмущений перспективных КА. Метод определения основных параметров динамической схемы основывается на предположении, что полученная выборка свободного движения представляет собой общее решение системы линейных дифференциальных уравнений, то есть имеет вид [3, 4, 7, 8]:

$$y(t) = \sum_{j=1}^{n} A_j e^{-\delta_j t} \sin(2\pi f_j t + \varphi_j), \qquad (1)$$

где n — общее число искомых составляющих в выборке; A_j — амплитуда вклада j-го тона; δ_j — декремент затухания j-го тона; f_j — частота j-го тона колебаний; ϕ_j — фаза j-го тона колебаний; t — время.

Необходимо максимально приблизить эту зависимость к колебательной части сигнала с прибора, полученного по каналам телеметрии [7, 8]. Для фиксации идентифицируемого сигнала нужно провести следующие предварительные операции [3, 4, 7, 8, 10, 11]:
— выделить участок телеметрической информации по угловым скоростям или углам, где наблюдаются колебания, определяемые влиянием жидкого наполнения;
— удалить из полученного сигнала низкочастотные и постоянные составляющие, обусловленные угловым движением космического аппарата относительно его центра масс (производится путем фильтрации низкочастотной составляющей и (или) удалением полиномиального тренда, соответствующего твердотельным формам движения изделия);
— привести сигнал к постоянному интервалу регистрации;
— определить частотные диапазоны основных гармонических составляющих сигнала на основе использования алгоритма быстрого преобразования Фурье;
— сместить сигнал, чтобы время первого замера в исследуемой части сигнала соответствовало началу временной оси (это необходимо для правильной оценки диссипативных и фазовых характеристик).

Преобразованный таким способом сигнал используется в качестве таблично заданной функции (x_i) при его аппроксимации зависимостью для определения параметров процесса. При подборе параметров используется метод наименьших квадратов. Параметры A_j, δ_j, f_j и φ_j определяются путем минимизации [3, 4, 7, 8]:

$$\sum_{i=1}^{m} (x_i - \sum_{j=1}^{n} A_j e^{-\delta j \times t_i} \sin(2\pi f_j t_i + \varphi_j))^2 \to \min, \qquad (2)$$

где x_i — значения сигнала, полученного при обработке результатов испытаний; t_i — моменты времени, соответствующие замерам x_i; m — количество замеров; A_j — амплитуда вклада j-го тона; δ_j — декремент затухания j-го тона; f_j — частота j-го тона колебаний; ϕ_j — фаза j-го тона колебаний.

Результаты моделирования и экспериментальные исследования учитывают следующие основные факторы:
— количество гармонических составляющих, проявляющихся в исследуемой выборке;
— близость расположения частот этих составляющих;
— длина выборки (определяет и позволяет достоверно оценить необходимое число периодов движения по самой низкой частоте);
— шаг записи сигнала (определяет необходимое число точек на периоде движения самой высокой частоты);
— разброс амплитуд отдельных движений составляющих выборки;
— наличие в выборке ненаблюдаемых входных воздействий.

Разумеется, все перечисленные факторы взаимозависимы, а их влияние на точность и достоверность результата определяется их сочетанием. Поэтому исследование проводится для каждого фактора при вариации остальных.

Созданный метод апробирован при работе осцилляторов, в результате которой силовые факторы воздействуют на места крепления. При определении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сил и моментов (работа модуля на штатной частоте импульсов шагового двигателя (ШД) 130 Гц) с учетом кинематической цепи конструкции применялась следующая последовательность разработки модуля:
— выбор из массива данных наиболее характерных результатов измерений (критерии выбора — максимальные амплитуды измеренных силовых параметров и максимальный набор пиков в АЧХ силовых параметров);
— анализ результатов измерений внешнего фона и колебаний систем крепления и обезвешивания в частотной области с целью выявления частот шумовых сигналов;
— составление списка диапазонов шумовых частот для каждого силового параметра;
— фильтрация из исходных процессов изменения силовых параметров в выбранных результатах измерения шумовых диапазонов частот (используется специальный пакет прикладных программ);
— сохранение результатов измерения отфильтрованных процессов и анализ их спектров с целью выявления основных осцилляторов кинематической цепи модуля.

Отдельные этапы разработки модуля описаны в [3, 4, 7, 8, 10, 11].

По представленным на рис. 1 схемам были проведены измерения сил и моментов, приходящих на места крепления модуля, для трех вариантов нагрузки на выходной вал со значениями момента инерции: 1) J_1 = 1,53 кгм^2; 2) J_2 = 6,1 кгм^2; 3) J_3 = 7,6 кгм^2.

Цель экспериментов — определить, как максимальные значения крутящего момента относительно оси вращения выходного вала зависят от величины момента инерции нагрузки на валу, а затем составить прогноз по величине крутящего момента для штатной нагрузки. При определении этой зависимости и крутильной жесткости на выходном валу модуля к анализу принимались измерения момента M_z относительно оси вращения выходного вала.

Крутильная жесткость определялась по формуле:

$$c = J_i 4\pi^2 f_i^2 , \quad (3)$$

где J_i — момент инерции нагрузки на выходном валу, кгм^2; f_i — низшая частота крутильных колебаний относительно оси вращения выходного вала, Гц; i — номер варианта нагрузки на выходной вал модуля.

Из полезного сигнала момента M_z (фильтрации) выделили процесс, в котором изменение данного момента происходит на низшей собственной частоте крутильных колебаний. Это позволило определить декременты колебаний.

Декременты крутильных колебаний выходного вала на низшей собственной частоте с различными вариантами нагрузки определялись по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln(A_m / A_{m+n}) , \quad (4)$$

где A_m — амплитуда ускорения на m-м цикле колебаний; A_{m+n} — амплитуда ускорения на $(m + n)$-м цикле колебаний; n — число принятых к анализу циклов колебаний.

При определении жесткости выходного вала и декрементов крутильных колебаний на низшей собственной частоте применялась описанная ниже последовательность действий.

1) Выбор трех наиболее характерных процессов изменения момента M_z для трех вариантов нагрузки на выходном валу модуля.

2) Определение низшей собственной частоты крутильных колебаний. В этом случае по максимальной амплитуде в АЧХ момента M_z определяется частотный диапазон, в котором предположительно находится значение низшей собственной частоты крутильных колебаний. С помощью узкополосной фильтрации анализируются узкие диапазоны частот в выбранной области (критерием низшей собственной частоты крутильных колебаний среди анализируемых отфильтрованных процессов является монотонное убывание амплитуды во времени и отсутствие биений).

3) По значениям низшей собственной частоты крутильных колебаний и момента инерции нагрузки с использованием формулы (3) определяется жесткость выходного вала.

4) Из полученного временного процесса изменения амплитуд крутильных колебаний на низшей собственной частоте определяются значения A_m, A_{m+n}, n, а по формуле (2) — декремент этих колебаний.

Особенности обработки результатов исследований воздействия на места крепления со стороны силовых факторов, возникающих при работе осцилляторов. Автоматически выполняется преобразование формата первичных данных измерений в формат, удобный для графического представления и анализа информации. Применение специальной программы позволяет значительно сократить время первичной обработки результатов измерений. Для исключения из исходного процесса шумовых сигналов также используется пакет специальных прикладных программ.

Для каждого из измеренных силовых параметров (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) характерны не только общие для всех них шумовые сигналы (например, сетевая электрическая помеха на частоте ~50 Гц или стабильное внешнее возмущение грунта в диапазоне частот от 16 до 17,5 Гц), но и собственные, обусловленные влиянием систем обезвешивания и крепления привода. Для каждого из силовых параметров требуется исключить в среднем двенадцать частотных диапазонов. Соответственно, в каждой выбранной для анализа совокупности результатов измерений требуется исключение разных наборов шумовых сигналов для каждого из силовых параметров, если решается задача определения динамических характеристик модуля с учетом кинематической цепи (при этом необходим анализ измеренных силовых параметров в широком диапазоне частот от 0 до 200 Гц). Критериями выбора результатов измерений силовых факторов являются: максимальные амплитуды силовых параметров; максимальный набор пиков в амплитудно-частотных характеристиках силовых параметров.

При обработке результатов измерений в задаче определения жесткости модуля на выходном валу и декремента колебаний на низшей собственной частоте необходимо из исходного сигнала (фильтрации) выделить процесс, в котором изменение силового параметра происходит на низшей собственной частоте крутильных ко-

лебаний. Эта процедура успешно реализуется в специальном пакете прикладных программ [3–4].

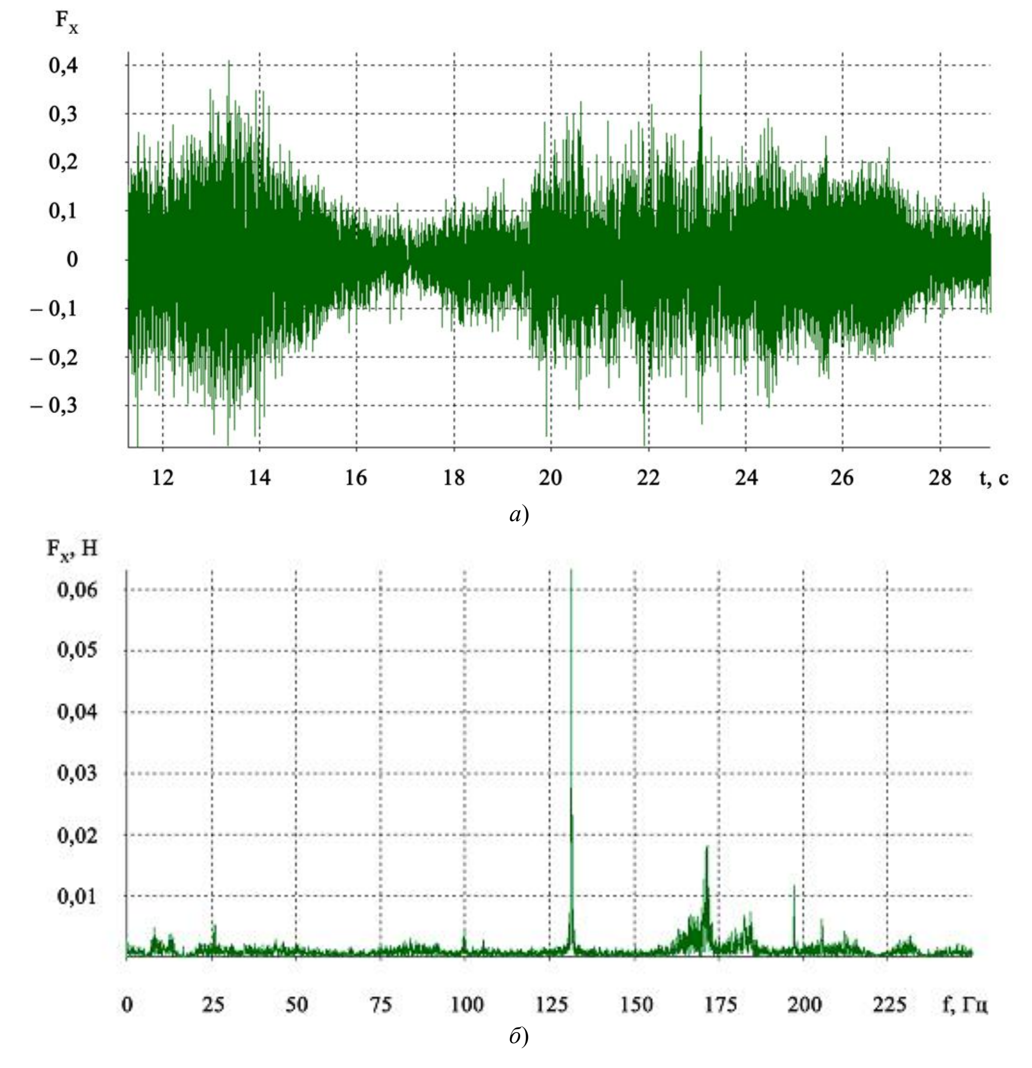
Методика выбора характерных режимов испытаний и соответствующих им результатов измерений. Основные схемы испытаний и режимы работы (частота импульсов шагового двигателя (ШД) 130 Гц) модуля были выбраны с учетом максимального приближения к условиям функционирования КА на орбите. Критериями выбора наиболее характерных режимов для решения поставленной задачи являются:
— отсутствие нагрузки на выходном валу;
— вертикальная ось вращения выходного вала;
— частота опроса данных измерений не менее 500 Гц (исследуемый диапазон частот — от 0 до 200 Гц).

Критериями выбора результатов измерений для определения динамических характеристик модуля с учетом кинематической цепи являются:
— максимальные амплитуды измеренных силовых параметров;
— максимальный набор пиков в АЧХ силовых параметров.

Методика выбора характерных режимов и результатов измерений для определения жесткости и декремента крутильных колебаний выходного вала модуля. Критериями выбора характерных режимов для решения поставленной задачи являются:
— вертикальная ось вращения выходного вала (см. рис. 1, *б*);
— три варианта нагрузки на выходном валу (величина нагрузки не менее 0,5 кгм^2);
— частота опроса данных измерений не менее 50 Гц (исследуемый диапазон частот — от 0 до 10 Гц).

Критерием выбора файлов являются максимальные амплитуды измеренного момента M_z.

Методика определения динамических характеристик модуля с учетом кинематической цепи. После обработки исходного измеренного сигнала формируется полезный сигнал, отражающий динамику звеньев кинематической цепи модуля при работе ШД на частоте управляющих импульсов 130 Гц. Анализ АЧХ каждого из силовых параметров (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) позволил выявить основные диапазоны частот, на которых имели место повышенные амплитуды этих параметров. В результате проведенных исследований определены временные процессы и спектры для сил F_x, F_y, F_z и моментов M_x, M_y, M_z. На рис. 3 представлены примеры временных процессов и спектров для силы F_x и момента M_x.



а)

б)

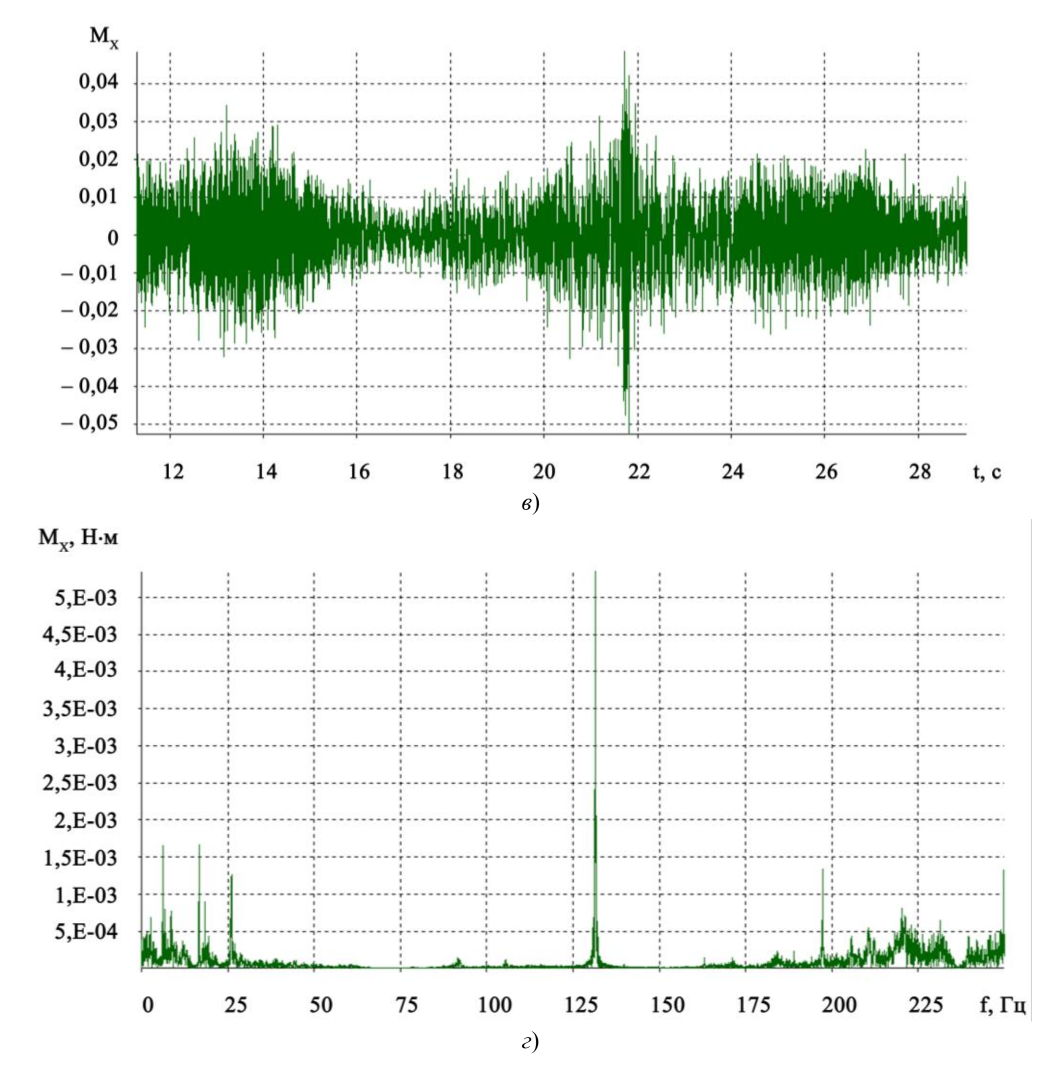


Рис. 3. Временной процесс (*а*) и спектр (*б*) силы F_x; временной процесс (*в*) и спектр (*г*) момента M_x на частоте ШД 130 Гц

Результаты определения динамических характеристик модуля на низшей собственной частоте крутильных колебаний выходного вала. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Частотные характеристики по параметрам сил F_x, F_y, F_z и моментов M_x, M_y, M_z при работе модуля на частоте импульсов ШД 130 Гц

№ п/п	Параметр нагрузки	Частота *f*, Гц (в скобках указано осредненное значение амплитуды нагрузки)
1	F_x, Н	0,5÷0,9 (0,014); 5÷6,1 (0,08); 8,2 (0,04); 12,3 (0,03); 26,2 (0,04); 45 (0,022); 91(0,02); 105 (0,014); 130 (0,39); 170 (0,01); 205 (0,04)
2	F_y, Н	5÷6,1 (0,014); 8,2 (0,02);12,3 (0,02); 26,2 (0,044); 45 (0,014); 91 (0,017); 130 (0,47); 170 (0,02); 205(0,04)
3	F_z, Н	0,5÷0,9 (0,07); 26,2 (0,04); 45 (0,015); 91 (0,04); 130 (0,1); 170 (0,02)
4	M_x, Нм	0,5÷0,9 (0,01); 8,2 (0,0025); 12,3 (0,03); 26,2 (0,025); 91 (0,0026); 105 (0,003); 130 (0,3); 170(0,001); 205 (0,0045)
5	M_y, Нм	5÷6,1 (0,016); 8,1 (0,0062); 26,2 (0,016); 45 (0,004); 91 (0,008); 105 (0,005); 130(0,075); 170 (0,01); 205 (0,0055)
6	M_z, Нм	0,5÷0,9 (0,0025); 5÷6,1 (0,005); 18,5 (0,004); 26,2 (0,011); 45 (0,006); 105 (0,0018); 130 (0,3); 170 (0,015)

После обработки исходных измеренных сигналов по предложенной методике получены данные для определения жесткости выходного вала по формуле и декрементов крутильных колебаний. Анализ крутильных колебаний выходного вала модуля проводился для моментов инерции: 1,53 кг·м^2; 6,1 кг·м^2; 7,6 кг·м^2. При исследованиях крутильных колебаний выходного вала модуля сравнивались две ситуации:

— ШД включен и кинематическая цепь в работе;

— ШД выключен.

В первом случае низшая собственная частота крутильных колебаний ниже, чем во втором. Результаты анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения жесткости выходного вала модуля с нагрузкой на низшей собственной частоте

Момент инерции нагрузки, кг·м^2	Низшая собственная частота системы, Гц		Жесткость выходного вала, Н·м/град	
		При работе модуля		При работе модуля
1,53	6,2	5,3	40,5	29,6
6,1	2,63	2,34	29,1	23
7,6	2,44	2,1	31,2	23,1
29	1,22	1,07	31	23

Полученные осредненные величины амплитуд моментов *Mz* и декрементов колебаний для низших собственных частот системы приведены в табл. 3.

Таблица 3

Декременты крутильных колебаний и осредненные амплитуды момента относительно оси вращения выходного вала

Момент инерции нагрузки, кг·м^2	Амплитуда *Mz*, Н·м	Декремент колебаний
1,53	0,022	0,06
6,1	0,115	0,14
7,6	0,14	0,14
29	~0,5	0,14

Примеры временного процесса момента *Mz* и его спектра для случая нагрузки на выходном валу модуля J_2 = 7,6 кгм^2 представлены на рис. 4.

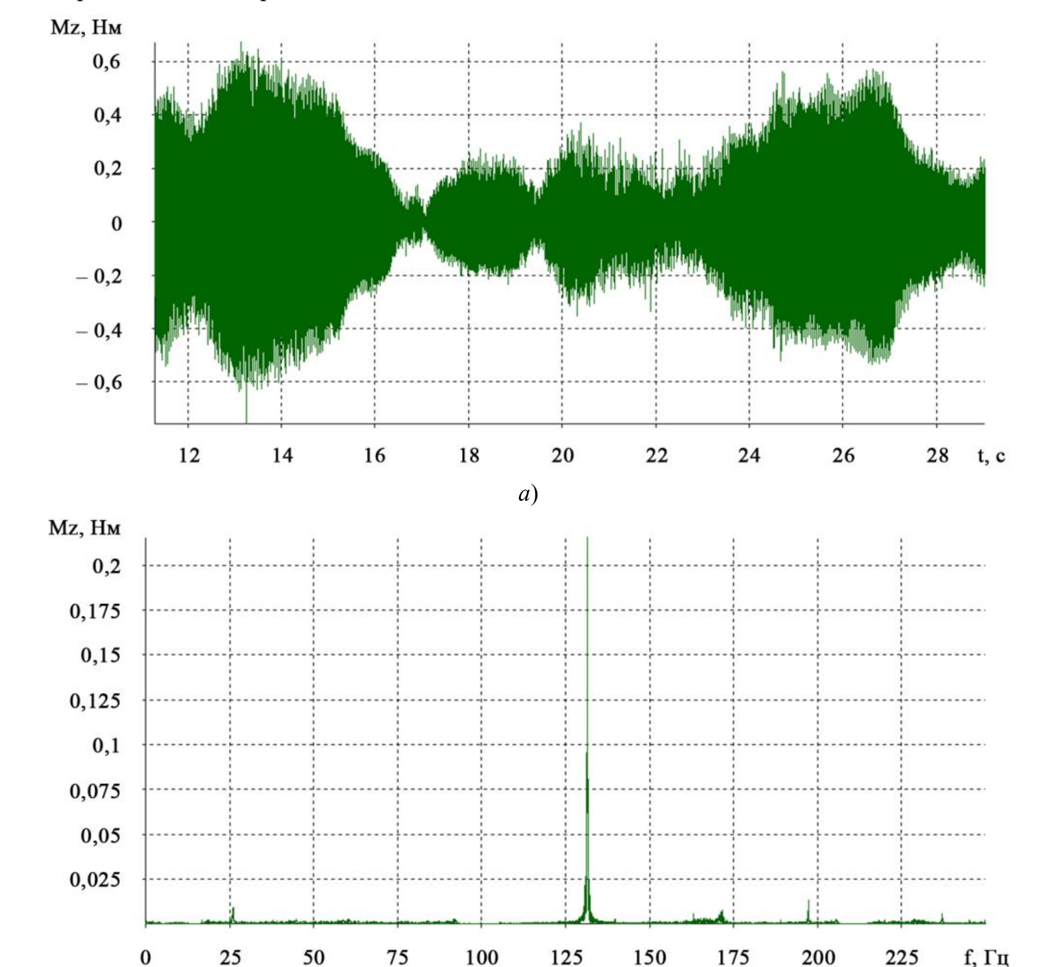


Рис. 4. Графики временного процесса (*а*) и спектра (*б*) момента *Mz* для случая нагрузки на выходном валу модуля J_2 = 7,6 кгм^2

Обсуждение и заключения. Исследования позволили определить динамику приводов перспективного КА и его составных частей как источников внутренних возмущений. Анализ результатов исследований показал, что для снижения влияния активных осцилляторов на динамическую точность перспективного КА в режиме прецизионной ориентации необходимо:

— провести экспериментальное подтверждение исходных данных по бортовым источникам возмущений;
— провести экспериментальное исследование диссипативных характеристик и характеристик жесткости конструкции перспективного КА;
— разработать критерии оценки влияния воздействий от бортовых источников возмущений на целевое функционирование перспективного КА в диапазоне частот до 100 Гц;
— уточнить среднечастотную динамическую модель перспективного КА по результатам экспериментальных исследований;
— провести анализ чувствительности бортовых приборов перспективного КА к вибрациям и разработать требования к виброактивности источников микровозмущений;
— провести определение виброактивности источников вибровозмущений: двигателя-маховика (ДМ), привода зеркала МСУ-ГС, измерителя солнечной постоянной ИСП-2М.

Результаты проведенных теоретико-экспериментальных исследований позволили решить перечисленные ниже задачи.

1) Анализ источников микровозмущений:
— анализ состава, режимов работы и характеристик бортовых источников микровозмущений;
— оценка вибровозмущений конструкции КА, генерируемых электромеханическими исполнительными органами (ЭМИО);
— оценка моментов, создаваемых ДМ по командам системы управления ориентацией и стабилизацией (СУОС);
— оценка вибровозмущений конструкции КА, генерируемых многозональным сканирующим устройством гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС);
— оценка вибровозмущений конструкции КА, генерируемых приводом солнечной батареи (СБ);
— оценка вибровозмущений конструкции КА, генерируемых приводом остронаправленной антенны (ОНА);
— оценка вибровозмущений конструкции КА, генерируемых измерителем солнечной постоянной величины (ИСП-2М).

2) Оценка динамических характеристик посадочных мест гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС) перспективного КА при вибрационных воздействиях от ИСП-2М, а также от:
— МСУ-ГС,
— ДМ (вибрации обусловлены командами СУОС и остаточным дисбалансом).

3) Оценка динамических характеристик посадочного места МСУ-ГС перспективного КА при возмущениях от ДМ по командам СУОС, ДМ, обусловленных остаточным дисбалансом, ИСП-2М.

Библиографический список

1. Ефанов, В. В. Фобос-Грунт. Проект космической экспедиции. В 2 т. Т. 1 / В. В. Ефанов, А. В. Захаров. — Москва : НПО им. С. А. Лавочкина ; Институт космических исследований РАН. — 237 с.

2. Ефанов, В. В. Фобос-Грунт. Проект космической экспедиции. В 2 т. Т. 2 / В. В. Ефанов, А. В. Захаров. — Москва : НПО им. С. А. Лавочкина ; Институт космических исследований РАН. — 345 с.

3. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. В 3 т. Т. 1. / Сост. В. В. Ефанов, И. Л. Шевалев ; под ред. В. В. Ефанова, К. М. Пичхадзе. — 2-е изд., перераб. — Москва : МАИ-Принт, 2013. — 492 с.

4. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. В 3 т. Т. 1. / Сост. В. В. Ефанов ; под ред. В. В. Хартова, В. В. Ефанова. — 2-е изд., перераб. — Москва : МАИ-Принт, 2014. — 544 с.

5. Теоретические основы расчета системы управления гидравлического привода стенда для испытаний поршневых гидравлических цилиндров / А. Т. Рыбак [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 3. — С. 242−249. https://doi.org/10.23947/1992–5980–2019–19–3–242–249.

6. Предложение по решению проблемы виброзащиты прецизионной оптико-электронной аппаратуры космического аппарата «СПЕКТР-УФ» / А. Н. Сова [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2013. — Т. 135, № 4. — С. 17–20.

7. Сова, А. Н. Метод и алгоритмы математического моделирования виброактивности космических аппаратов с учетом внутренних источников возмущений на основе результатов экспериментальных исследований / А. Н. Сова // Двойные технологии. — 2019. — № 3 (88). — С. 52–56.

8. Сова, А. Н. Метод и результаты математического моделирования механических воздействий двига-

телей-маховиков космических аппаратов на основе результатов экспериментальных исследований / А. Н. Сова // Двойные технологии. — 2019. — № 3 (88). — С. 57–63.

9. Современное состояние и направления применения магнитожидкостных технических средств и систем в ракетной и ракетно-космической технике / А. Н. Сова [и др.] // Труды МИТ. — 2014. — Т. 14, ч. 1. — С. 92–102.

10. Чеботарев, В. Е. Особенности ориентации навигационных космических аппаратов / В. Е. Чеботарев, А. В. Фатеев // Космические аппараты и технологии. — 2018. — № 2 (24). — С. 84–87.

11. Чеботарев, В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения. В 2 кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / В. Е. Чеботарев. — Красноярск : Изд-во Сиб. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. — 140 с.

Сдана в редакцию 01.09.2019
Принята к публикации 05.10.2019

Об авторах:

Сова Александр Николаевич,
заведующий кафедрой «Транспортные установки» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (РФ, 125319, г. Москва, пр. Ленинградский, 64), доктор технических наук, профессор, действительный член (академик) Российской академии космонавтики имени К. Э. Циолковского,
ORCID: https://orcid.org/0000–0002–0213–6978
slsova@mail.ru

Степанов Михаил Иванович,
профессор кафедры «Транспортные установки» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (РФ, 125319, г. Москва, пр. Ленинградский, 64), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0331–5246
madi.1965@mail.ru

Сова Владислав Александрович,
обучающийся кафедры «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (РФ, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1),
ORCID: https://orcid.org/0000–0002–8431–2233
vladislavsovaa@gmail.com

Быков Артем Иванович,
аспирант акционерного общества «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина» (РФ, 141400, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, 24),
ORCID: https://orcid.org/0000–0001–9972–7389
bykovartem1994@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.22+620.178.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-328-334

Анализ начальной стадии усталостного износа гетероструктурных материалов в условиях контактных циклических нагрузок[*]

О. В. Кудряков[1], В. Н. Варавка[2], И. Ю. Забияка[3], Э. А. Ядрец[4], О. В. Шведчикова[5]**
[1, 2, 3, 4, 5] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Analysis of the initial stage of fatigue wear in heterostructure materials under contact cyclic loading[***]

O. V. Kudryakov[1], V. N. Varavka[2], I. Yu. Zabiyaka[3], E. A. Yadrets[4], O. V. Shvedchikova[5]**
[1, 2, 3, 4, 5] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассмотрен процесс формирования усталостных дефектов в металлических сплавах с различной структурной морфологией. Цель работы — создание расчетного аппарата для определения момента зарождения указанных дефектов в условиях циклического нагружения.
Материалы и методы. Построена физическая модель, представлены расчетные выражения. В основу физической модели положена теория дислокаций. Показано, что при динамических циклических нагружениях определяющее значение в процессе зарождения очагов разрушения имеет структурный фактор. В зависимости от структуры и свойств материала, а также от характера нагрузок, критический усталостный дефект развивается в форме трещины, поры или микрократера износа.
Результаты исследования. Выполнен численный эксперимент по определению момента зарождения дефекта критического размера в сплавах на основе железа при высокоскоростных капельных соударениях. Представлены сравнительные данные расчетов и стендовых испытаний по каплеударной эрозии сталей и сплавов со структурой феррита, аустенита, сорбита и мартенсита. Оценен вклад стадии зарождения в инкубационный период эрозионного износа исследованных материалов.
Обсуждение и заключение. Строгие инструментальные методы для определения продолжительности стадии зарождения отсутствуют, поэтому рекомендовано использовать предложенную расчетно-аналитическую модель. Кроме того, выполненная работа дала важный прикладной результат — продемонстрировала, что целенаправленное конструирование структуры материала может существенно увеличить износостойкость.

Ключевые слова: сплавы на основе железа, субструктура сплавов, циклические нагрузки, зарождение очагов разрушения, физическая модель, численный эксперимент, каплеударная эрозия.

Introduction. The process of formation of fatigue defects in metal alloys with different structural morphology is considered. The work objective is to develop a computational tool for determining the moment of the defect nucleation under cyclic loading.
Materials and Methods. A physical model is built, calculation expressions are presented. The physical model is based on the theory of dislocations. It is shown that a structure factor is particularly important in the process of fracture nucleus origination under dynamic cyclic loading. Depending on the structure and properties of the material, as well as on the nature of the loads, the critical fatigue defect develops in the form of cracks, pores or micro-crater wear.
Research Results. A numerical experiment was performed to determine the moment of nucleation of the critical-size defect in iron-base alloys under the drop hypervelocity impacts. Comparative data of calculations and bench tests for droplet impingement erosion of steels and alloys with the structure of ferrite, austenite, sorbitol and martensite are presented. The efficiency of the nucleation stage during the incubation period of erosive wear of the materials studied was evaluated.
Discussion and Conclusions. There are no strict instrumental methods for determining the duration of the nucleation stage; therefore, it is recommended to use the proposed analytical model. In addition, the work performed gave a significant application result, i.e. it showed that the focused design of the material structure can significantly increase the wear resistance.

Keywords: iron-base alloys, alloy substructure, cyclic loadings, fracture nucleus origination, physical model, numerical experiment, droplet impingement erosion.



[*]Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00546).
[**]E-mail: kudryakov@mail.ru, varavkavn@gmail.com, zabiyakaigor@gmail.com, xperia1058@gmail.com, oshviedchikova@mail.ru
[***]The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 18-08-0054b).

Образец для цитирования: Анализ начальной стадии усталостного износа гетероструктурных материалов в условиях контактных циклических нагрузок / О. В. Кудряков [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 328−334. https://doi.org/ 10.23947/ 1992-5980-2019-19-4-328-334

For citation: O.V. Kudryakov, et al. Analysis of the initial stage of fatigue wear in heterostructure materials under contact cyclic loading. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 328−334. https://doi.org/10.23947/ 1992-5980-2019-19-4-328-334

Введение. Моделирование специфических непрогнозируемых явлений весьма актуально с точки зрения предотвращения их нежелательных последствий. Например, в аэронавтике, теплоэнергетике, газотурбинном производстве и сельском хозяйстве остается нерешаемой проблема каплеударной эрозии. Вопрос обсуждается на мировом уровне [1–4]. Первые успехи в моделировании этого явления касались единичных капельных соударений [5–10]. В некоторых работах [11–13] предприняты попытки количественно оценить способность материалов и покрытий сопротивляться действию динамических циклических нагрузок. В частности, удалось создать расчетно-аналитическую модель, апробированную в условиях жидкокапельного ударного воздействия [14–18]. Многие авторы [19–21] не дифференцируют поведение материала или покрытия на стадиях зарождения и развития разрушения. Зарождение весьма проблематично идентифицируется в эксперименте. В названной выше модели оно оценивалось с помощью эмпирических коэффициентов, не имевших универсального теоретического обосновании, и это явный недостаток решения. Цель настоящей работы — более глубокое теоретическое рассмотрение стадии зарождения дефектов в покрытии, приводящих к его износу и разрушению, а также создание на этой основе расчетного аппарата для определения момента зарождения трещин или пор в различных материалах и покрытиях в условиях циклического нагружения.

Материалы и методы. Трудности оценки стадии зарождения разрушения и износа при циклических воздействиях (например, при высокоскоростных жидкокапельных соударениях, провоцирующих каплеударную эрозию металлических изделий) связаны не только с инструментальным определением зародышей трещин или пор. На этой стадии наличие структурных элементов в материале не позволяет представить процесс непрерывным континуумом и использовать для расчетов линейную механику разрушения (например, усталостную теорию Пэриса — Эрдогана). Поэтому в механике разрушения начальная стадия зарождения усталостных дефектов выделяется в особый этап. Он называется «микроструктурная механика разрушения» и протекает вплоть до достижения дефектом размера $l_k = (4…10)·d$, где d — размер структурного элемента материала [22]. Аналитическая оценка стадии зарождения усталостных дефектов требует, прежде всего, металлофизического подхода. Задача заключается в нахождении расчетного выражения для числа циклических нагружений N_3, необходимых для формирования в материале усталостного дефекта критического размера. В качестве эмпирической базы расчетной модели можно использовать также экспериментальные данные стендовых испытаний на каплеударную эрозию, где роль N_3 выполняет количество капельных соударений.

В общем случае уравнение для числа динамических циклических нагружений N_3 должно включать три составляющие: механическую, кинетическую и структурную.

Металлофизическая концепция механической составляющей связана с числом (плотностью) подвижных дислокаций ρ_m, возникающих при единичном ударном нагружении (соударении). В процессе многократных соударений количество подвижных дислокаций увеличивается, они перемещаются в металлической матрице по плоскостям скольжения под действием касательных напряжений σ_s до тех пор, пока не сформируют на ближайших непреодолимых барьерах плоские скопления с критической плотностью ρ_{kr}. Превышение ρ_{kr} ведет к самопроизвольному разрыву межатомных связей в металле и образованию зародыша трещины. Значения ρ_{kr} для различных материалов и покрытий известны [23]. Механическая составляющая числа соударений выражается в форме зависимости $N_3 = f(\rho_{kr}/\rho_m)$.

Кинетическая составляющая числа соударений N_3 учитывает зависимость энергии дислокации от ее скорости V_d. Из теории дислокаций известно, что по мере возрастания скорости дислокации ее энергия увеличивается в соответствии с выражением Эйнштейна для тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Только пределом для скорости дислокации является скорость звука в кристалле C_0, при которой энергия дислокации становится бесконечной. Поэтому с учетом специфики каплеударного воздействия кинетическая составляющая числа соударений выразится как $N_3 = f(V_d / C_0)$.

Структурная составляющая числа соударений N_3 имеет два аспекта. Первый заключается в том, что движение дислокаций при ударе ограничено размерами структурного элемента матрицы D, в пределах которого возможен свободный пробег дислокаций. В общем случае в качестве такого элемента рассматривается размер зерна, а для тонких покрытий — его толщина. Второй аспект учитывает, что в пределах зерна или покрытия могут существовать препятствия для движения дислокаций: частицы вторичных фаз, малоугловые границы,

закрепленные атмосферами неподвижные дислокации, дефекты упаковки, сопротивление решетки (напряжение Пайерлса). Как отмечено выше, оба эти аспекта отражены в структурной составляющей числа соударений, и она представляет собой функцию двух переменных $N_3 = f(D, \Delta G)$, где ΔG — свободная энергия Гиббса для активации процесса преодоления препятствий, находящихся в пределах структурного элемента D. Механизм преодоления зависит от природы препятствия, что и определяет значение ΔG для каждого конкретного случая структуры материала (их классификация приведена в [23]).

Из сказанного следует, что все составляющие искомого числа соударений N_3 влияют на процесс формирования усталостного дефекта одновременно — при каждом соударении. Этот факт определяет коммутативный характер взаимодействия механической, кинетической и структурной составляющих. Тогда в наиболее общем виде N_3 определяется выражением

$$N_3 = \frac{\rho_{kr}}{\rho_m} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_d}{C_0}\right)^2} \cdot \frac{D}{l_0} \cdot e^{-\frac{\Delta G}{kT}}, \qquad (1)$$

где k — постоянная Больцмана; T — термодинамическая температура, К; l_0 — путь, пройденный подвижными дислокациями за один цикл нагружения (соударение).

Выражение (1) получено на основе теории дислокаций и представляет собой теоретическую концепцию. Для использования (1) при оценке износостойкости материалов и покрытий в условиях циклических жидкокапельных соударений необходимо раскрыть входящие в него величины (такие как ρ_m, V_d, l_0, ΔG) через измеряемые параметры соударения (например, скорость соударения V_0 и размер капли R_0). Авторы уже выполнили соответствующую детализацию модели (1) и готовят материал к публикации.

Результаты исследования. Расчетная модель апробирована для сплавов на основе железа различного состава и структуры. Такой выбор обусловлен, прежде всего, различием в поведении дислокаций в этих сплавах и позволяет выявить возможности расчетной модели. Так, в феррите и аустените фактор, тормозящий дислокации, — это сопротивление решетки (напряжение Пайерлса). В сорбитной структуре скольжение дислокаций определяется морфологией и распределением препятствий — карбидами Fe и Cr. В мартенсите движение дислокаций затруднено изначально. Таким образом, предметом исследования этой части работы фактически является структурный фактор.

Поскольку все исследованные материалы представляют собой сплавы на основе железа, их основные физико-механические характеристики отличаются не существенно. В расчетах использовались следующие значения: модуль упругости $E = 186…218$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}20…0{,}31$; модуль сдвига $\mu = 64…80$ ГПа; вектор Бюргерса $b = 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ м. Данные численных экспериментов по реализации представленной модели и стендовых испытаний сплавов на основе Fe с различной структурной морфологией, в том числе и гетерогенных, приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Экспериментальные m_0 и расчетные N_3 значения числа соударений* для сплавов на основе Fe

Материал (структура)	Параметры структуры				Параметры соударения					
					$V_0 = 250$ м/с; $R_0 = 0{,}55$ мм			$V_0 = 340$ м/с; $R_0 = 0{,}32$ мм		
	Решетка (M_p)	α_1	D [м$^{-6}$]	l [м$^{-6}$]	Расчет		Эксп.	Расчет		Эксп.
					N_3	α_0	m_0	N_3	α_0	m_0
АРМКО Fe (феррит)	ОЦК (2,9)	0,5	100	3,0	2197	—	—	1187	—	—
08Х18Н10Т (аустенит)	ГЦК (3,06)	0,5	100	3,0	2446	0,253	9680	1322	0,154	8597
20Х13 (сорбит)	ОЦК (2,9)	2,0	100	0,35–0,50	4655	0,280	16630	3742	0,254	14768
20Х13 (мартенсит)	Тетраг. (2,95)	0,02	0,01	0,01	9844	0,550	17861	5705	0,470	12140
*Представлены значения чисел капельных соударений, попадающих в одну точку (определяются в программном обеспечении испытательного стенда).										

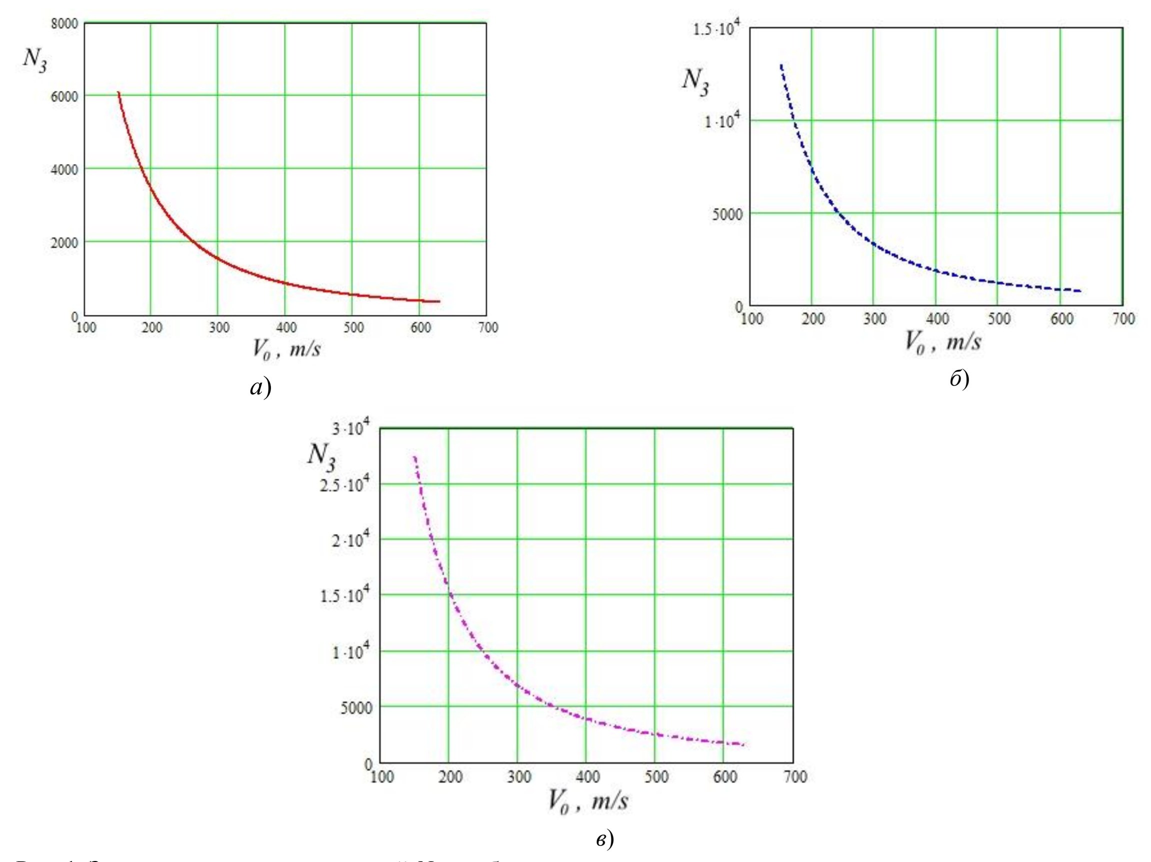


Рис. 1. Зависимости числа соударений N_3, необходимых для зарождения трещин, от скорости соударения V_0 при $R_0 = 0{,}55$ мм для сплавов на основе Fe с различной структурой: феррит железа АРМКО (*а*); сорбит стали 20Х13 (*б*); мартенсит стали 20Х13 (*в*)

Значения некоторых параметров, приведенных в табл. 1, нуждаются в пояснении. В качестве расстояния между препятствиями l на пути подвижных дислокаций в феррите и аустените принимается расстояние между дислокациями, то есть $l = 1/\sqrt{\rho_d}$. Учитывая высокую пластичность этих твердых растворов, плотность их дислокаций относительно невелика $\rho_d = 10^{11}$ м$^{-2}$, что дает $l \approx 3$ мкм. В закаленной стали плотность дислокаций близка к критической $\rho_{kr} = 10^{16}$ м$^{-2}$, что не только дает значение структурного параметра $l \approx 0{,}01$ мкм в табл. 1, но и изменяет методику расчета числа соударений в исходной модели (1).

Для упрочненных металлических материалов (например, для сильно деформированных или закаленных сплавов, в том числе 20Х13 с мартенситной структурой), в выражении (1) первые три сомножителя обращаются в единицу. В таких материалах критическая плотность дислокаций ρ_{kr} уже достигнута, поэтому понятие подвижных дислокаций ρ_m теряет смысл. В численном виде это выражается так: $\rho_{kr}/\rho_m = 1$; $V_d = 0$; $D = l_0 = 1/\sqrt{\rho_{kr}}$. Что же касается экспоненты в выражении (1), то она сохраняет свой смысл со значениями параметров α_1 и l, приведенными в табл. 1. Чтобы в такой структуре зародилась трещина, внешнему циклическому воздействию необходимо преодолеть существующие напряжения в насыщенной дислокационной среде и сформировать дефект сдвигового характера. Учитывая сказанное, расчетное выражение (1) для закаленной стали примет вид [23–26]:

$$N_3 = \left(\frac{\mu}{\sigma_s}\right)^2 \cdot e^{\left(-\frac{\Delta F}{kT}\right)\cdot\left(1-\frac{\sigma_s}{\sigma_\tau}\right)} \quad (2)$$

Здесь ΔF — энергия активации процесса преодоления препятствия без приложения внешнего напряжения, величина ΔF фактически определяет прочность препятствий с точки зрения прохождения их дислокацией; σ_τ — внутреннее напряжение, существующее в материале и позволяющее дислокации проходить препятствие при минимальных значениях ΔG. В качестве σ_τ принимается напряжение течения твердого тела при $T = 0$К. Величины σ_τ и ΔF являются свойствами материала и в общем случае выражаются через его базовые физические характеристики μ и b:

$$\sigma_\tau = \mu \cdot b / l; \Delta F = \alpha_1 \cdot \mu \cdot b^3 \quad (3)$$

Коэффициент α_1 в выражениях (3) классифицирует препятствия по их прочности [23].

В качестве напряжения σ_s в выражении (2) рассматривается сдвиговое напряжение в плоскости скольжения, под действием которого происходит перемещение подвижных дислокаций. Напряжение σ_s представляет собой проекцию вектора внешнего напряжения на плоскость скольжения и связано с системой скольжения решетки через фактор Тейлора M_p по закону Шмидта — Боаса для поликристалла [27]. Оно может быть выражено через параметры соударения V_0 и R_0 [28].

Экспериментальные значения, показанные в табл. 1, характеризуют инкубационный период эрозионного износа материала m_0. Эта величина включает как стадию зарождения дефекта (трещины, поры, микрократеры), так и стадию его развития до начала потери массы образцом. Не представляется возможным инструментально выделить в экспериментальных величинах m_0 количество соударений, приходящихся только на стадию зарождения, поэтому значения N_3 являются исключительно расчетными. Вклад стадии зарождения в общее значение характеризуется коэффициентом $\alpha_0 = N_3 / m_0$.

Кроме численных значений, представленных в табл. 1, модель учитывает количество соударений N_3, необходимое для зарождения очага разрушения (трещины, поры, микрократеры), и скорость соударений V_0 при фиксированных значениях размера капли R_0. Кроме того, используя данное решение, можно определить зависимость N_3 от V_0. Некоторые варианты таких зависимостей представлены на рис. 1.

Полученные результаты показывают, что расчетные данные N_3 не противоречат эксперименту (данным стендовых испытаний m_0). Они также демонстрируют соответствие базовым канонам механики разрушения. В частности, коэффициент α_0 характеризует энергию зарождения по отношению к энергии разрушения. В пластичных металлических материалах (АРМКО, аустенит, сорбит) энергия зарождения усталостных трещин существенно меньше энергии их роста. В упрочненных сплавах (мартенсит) энергия зарождения практически всегда выше энергии роста. Как правило, это соотношение значительно больше в пользу стадии зарождения. Данные табл. 1 показывают, что в стали 20Х13 с мартенситной структурой стадия зарождения усталостного дефекта N_3 составляет около половины всего инкубационного периода формирования износа m_0: $\alpha_0 = 0{,}47$ и 0,55 для скоростей соударения $V_0 = 340$ м/с и 250 м/с соответственно. Тогда как для той же стали с сорбитной структурой коэффициент α_0 вдвое меньше. Полученные нами значения α_0 соответствуют данным других авторов для аналогичных условий циклического нагружения (например, для стали 30ХГСН2А в [29]).

Расчетные зависимости на рис. 1 также соответствуют данным экспериментов. Они расположены асимптотически по отношению к значениям $V_0 \approx 100…150$ м/с (проведенный численный эксперимент эту область подробно не исследовал). Названные выше расчетные зависимости соответствуют итогам стендовых испытаний, которые показали, что при $V_0 < 135$ м/с в сплавах на основе железа износ вообще не наблюдается [30–34]. То есть асимптотичность графиков на рис. 1 подтверждает этот эмпирический факт: при указанных низких скоростях соударений не образуются усталостные дефекты критического размера.

Обсуждение и заключение. Не существует инструментальных методов точного определения продолжительности стадии зарождения очагов разрушения материалов, поэтому при необходимости используется предложенная расчетно-аналитическая модель. Она применима к материалам различной морфологии, в которых механизмы зарождения дефектов (трещин, пор, микрократеров) имеют дислокационную природу. Поэтому при нормальных условиях модель не применима к керамическим материалам с высокой долей ковалентных связей. Другим ограничением использования модели является, пожалуй, слишком высокая чувствительность экспоненциального множителя в выражениях (1) и (2). Небольшая погрешность при определении численных значений величин α_1, σ_s или l в этих формулах не позволяет получить результаты, адекватные экспериментальным данным. Выполненная работа дала важный прикладной результат — продемонстрировала, что целенаправленное конструирование структуры материала может существенно увеличить износостойкость.

Библиографический список

1. Field, J. E. The Effects of Target Compliance on Liquid Drop Impact / J. E. Field, J. P. Dear, J. E. Ogren // Journal of Applied Physics. — 1989. — Vol. 65. — P. 533–540.

2. Heymann, F. J. Liquid Impingement Erosion / F. J. Heymann // Friction, Lubrication, and Wear Technology. — 1992. — Vol. 18. — P. 214–220.

3. Itoh, H. Evaluation of Erosion by Liquid Droplet Impingement for Metallic Materials / H. Itoh, N. Okabe // Transaction of JSME. — 1993. — Vol. 59. — P. 2736–2741.

4. Richman, R. H. Liquid-Impact Erosion / R. H. Richman // Failure Analysis and Prevention. — 2002. — Vol. 11. — P. 1013–1018.

5. Haller, K. K. Computational Study of High-speed Liquid Droplet Impact / K. K. Haller, Y. Ventikos, D. Poulikakos // Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 92. — P. 2821–2828.

6. Arai, J. Numerical Analysis of Droplet Impingement on Pipe Inner Surface Using a Particle Method / J. Arai, S. Koshizuka // Journal of Power Energy Systems. — 2009. — Vol. 3. — P. 228–236.

7. Xiong, J. Numerical Analysis of Droplet Impingement Using the Moving Particle Semi-implicit Method / J. Xiong, S. Koshizuka, M. Sakai // Journal of Nuclear Science Technology. — 2010. — Vol. 47. — P. 314–321.

8. Li, R. A Numerical Study of Impact Force Caused by Liquid Droplet Impingement onto a Rigid Wall / R. Li, H. Ninokata, M. Mori // Progress in Nuclear Energy. — 2011. — Vol. 53. — P. 881–885.

9. Li, R. A Numerical Study on Turbulence Attenuation Model for Liquid Droplet Impingement Erosion / R. Li [et al.] // Annals of Nuclear Energy. — 2011. — Vol. 38. — P. 1279–1287.

10. Sanada, T. A Computational Study of High-speed Droplet Impact / T. Sanada, K. Ando, T. Colonius // Fluid Dynamics Materials Processing. — 2011. — Vol. 7. — P. 329–340.

11. Kudryakov, O. V. Integrated Indentation Tests of Metal-Ceramic Nanocomposite Coatings / O. V. Kudryakov, V. N. Varavka // Inorganic Materials. — 2015. — Vol. 51, № 15. — P. 1508–1515.

12. Varavka, V. N. Regularities of Steel Wear under the Impact of Discrete Water-Droplet Stream. Part I: Initial Stage of Droplet_Impingement Erosion / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov // Journal of Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 71–79.

13. Varavka, V. N. Regularities of Steel Wear under the Impact of Discrete Water-Droplet Stream. Part II: Stage of the Developed Droplet-Impingement Erosion / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov // Journal of Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 2. — P. 153–162.

14. Оценка эрозионной стойкости упрочненных металлических сплавов в условиях каплеударного воздействия / О. В. Кудряков [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 6–15.

15. Application of Nanocomposite Coatings to Protect Power Equipment from Droplet Impingement Erosion / V. N. Varavka [et al.] // Thermal Engineering. — 2014. — Vol. 61, no. 11. — P. 797–803.

16. Кинетика зарождения и развития процесса эрозионного разрушения поверхности сталей при каплеударном воздействии / В. А. Рыженков [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. — 2012. — № 1 (16). — С. 67–71.

17. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов / В. Н. Варавка [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2011. — № 6. — С. 92–98.

18. Li, R. A Calculation Methodology Proposed for Liquid Droplet Impingement Erosion / R. Li, M. Mori, H. Ninokata // Nuclear Engineering and Design. — 2012. — Vol. 242. — P. 157–163.

19. Sasaki, H. Numerical Analysis of Influence of Roughness of Material Surface on High-Speed Liquid Droplet Impingement / H. Sasaki, Y. Iga // Journal of Pressure Vessel Technology. — 2019. — Vol. 141, 031404. — 7 p.

20. Isomoto, Y. Erosion Phenomenon Caused by Water Droplet Impingement and Life Prediction of Industrial Materials. Part 2. Establishment of Predictive Equations and Evaluation of Material Performance / Y. Isomoto, H. Miyata // Zairyo-to-Kankyo. — 2008. — Vol. 57. — P. 146–152.

21. Modeling Study of Liquid Impingement Erosion of NiAl Alloy / J. Zhao [et al.] // Wear. — 2014. — Vol. 311. — P. 65–70.

22. Ботвина, Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л. Р. Ботвина. — Москва : Наука, 2008. — 334 с.

23. Frost, H. J. Deformation-Mechanism Maps. The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics / H. J. Frost, M. F. Ashby. — Oxford ; New York ; Sydney : Pergamon, 1982. — 166 p.

24. Kudryakov, O. V. Dislocation Quasi-Dipoles and Their Possible Role in Martensitic Transformations in Steel / O. V. Kudryakov // The Physics of Metals and Metallography. — 2002. — Vol. 94, № 5. — P. 421–428.

25. Кудряков, О. В. Феноменология мартенситного превращения и структуры стали / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004. — 200 с.

26. Hedström, P. Deformation and Martensitic Phase Transformation in Stainless Steels / P. Hedström. — Luleå : Universitetstryckeriet, 2007. — 218 p.

27. Ashby, M. F. Engineering Materials. An Introduction to their Properties and Applications / M. F. Ashby, D. R. Jones. — 2nd ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 1996. — 322 p.

28. Morphological features and mechanics of destruction of materials with different structures under impact drop cyclic loading / V. N. Varavka [et al.] // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 132, 03004. — 4 p.

29. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пособ. : в 4 т. Т. 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / С. Е. Ковчик, Е. М. Морозов. — Киев : Наукова думка, 1988. — 436 с.
30. Селезнев, Л. И. Эрозионный износ конструкционных материалов / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков // Технология металлов. — 2007. — № 3. — С. 19–24.
31. Ahmad, M. Experimental Assessment of Droplet Impact Erosion Resistance of Steam Turbine Blade Materials / M. Ahmad, M. Casey, N. Sürken // Wear. — 2009. — Vol. 267. — P. 1605–1618.
32. Seleznev, L. I. Phenomenology of Erosion Wear of Constructional Steels and Alloys by Liquid Particles / L. I. Seleznev, V. A. Ryzhenkov, A. F. Mednikov // Thermal Engineering. — 2010. — Vol. 57, № 9. — P. 741–745.
33. Experiments on Liquid Droplet Impingement Erosion by High-speed Spray / N. Fujisawa [et al.] // Nuclear Eng. Design. — 2012. — Vol. 250. — P. 101–107.
34. Hattori, S. Effect of Impact Angle on Liquid Droplet Impingement Erosion / S. Hattori, M. Kakuichi // Wear. — 2013. — Vol. 298–299. — P. 1–7.

Сдана в редакцию 05.09.2019
Принята к публикации 18.11.2019

Об авторах:

Кудряков Олег Вячеславович,
профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, главный научный сотрудник НОЦ «Материалы» ДГТУ (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1462-4389
kudryakov@mail.ru

Варавка Валерий Николаевич,
профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, руководитель НОЦ «Материалы» ДГТУ (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4703-7372
varavkavn@gmail.com

Забияка Игорь Юрьевич,
аспирант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета, мл. научный сотрудник НОЦ «Материалы» ДГТУ (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6759-549X
zabiyakaigor@gmail.com

Ядрец Эдуард Александрович,
магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2943-2160
xperia1058@gmail.com

Шведчикова Ольга Валерьевна,
магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0404-8418
oshviedchikova@mail.ru

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 335–341. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 335–341. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 629.4.018: 620.179.162 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341

Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог*

А. Н. Киреев[1], Я. К. Склифус[2], М. А. Киреева[3]**
[1,3] Луганский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, Украина
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Validity and informativity enhancement of ultrasonic testing of cast parts of railway rolling stock***

A. N. Kireev [1], Y. K. Sklifus [2], M. A. Kireeva[3]**
[1,3] Lugansk National University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Ukraine
[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Структура литых деталей подвижного состава железных дорог (ПСЖД) по технологическим причинам часто имеет внутренние дефекты, которые существенно влияют на их прочность. Степень влияния зависит от множества факторов, включая форму и расположение дефектов в изделии. Форма дефекта оказывает наибольшее влияние при знакопеременных нагрузках. Это часто относиться к динамически нагруженным деталям экипажной части ПСЖД. Максимально снижает долговечность детали дефект, ориентированный перпендикулярно к направлению растягивающих нагрузок. Для выявления внутренних дефектов детали подвергаются ультразвуковому контролю классическим эхо-импульсным методом. Однако такие методики требуют повышения достоверности и информативности. Например, они не позволяют определить тип и ориентацию дефекта.

Материалы и методы. Рассмотрены особенности, преимущества и недостатки классического эхо-импульсного метода ультразвукового неразрушающего контроля, который основан на регистрации следующих эхо-сигналов:

- посланный;
- отраженный от противоположной поверхности (дна) объекта;
- отраженный от дефекта (при его наличии).

Время прихода импульсов пропорционально толщине детали. При наличии дефекта это время пропорционально расстоянию от поверхности ввода импульсов до дефекта. Этим методом можно определить наличие дефекта, однако нет возможности определить его тип.

Результаты исследования. Для определения формы дефекта предложен двухчастотный метод дефектометрии. Описана его сущность, алгоритм и реализуемые аналитические зависимости. При обнаружении в объекте контроля эхо-сигнала от дефекта измеряются амплитуды донных сигналов и амплитуды эхо-сигналов от дефекта на частотах ультразвуковой волны 2,5 МГц и 5,0 МГц. Рассчитывается

Introduction. Due to the process reasons, the structure of cast parts of the railway rolling stock (RRS) often has embedded flaws that affect drastically their strength. The degree of impact depends on many factors including the shape and location of defects in the product. The shape of the defect has the greatest effect under alternating loads. This often refers to dynamically loaded parts of the RRS underframe. The defect oriented perpendicularly to the direction of tensile loads reduces the component life to the maximum. To identify embedded flaws, the parts are subjected to ultrasonic testing by the classical pulse-echo technique. However, such methods require increased validity and informativity. For example, they do not provide the determination of the type and orientation of the defect.

Materials and Methods. Features, advantages and disadvantages of the classical pulse-echo technique of the ultrasonic non-destructive testing, which is based on the registration of the following echo signals, are considered:

- sent;
- reflected from the opposite surface (bottom) of the object;
- reflected from the defect (if any).

The pulse arrival time is proportional to the thickness of the part. If there is a defect, this time is proportional to the distance from the pulse input surface to the defect. This method can determine the presence of a defect, but it cannot determine its type.

Research Results. To determine the shape of a defect, a dual-frequency defectometry method is proposed. Its principle, algorithm and implemented analytical dependencies are described. When an echo signal from a defect is detected in the monitoring object, the amplitudes of the bottom signals and the amplitudes of the echo signals from the defect are measured at the ultrasonic wave frequencies of 2.5 MHz and 5.0 MHz. The defect shape factor is calculated from the



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР №5 от 04.02.2019 в Луганском национальном университете им. В. Даля.
**E-mail: lifter_23@mail.ru, keiser@i.ua, lifter_23@mail.ru
***The research is done within the frame of independent R&D no. 5 of 04.02.2019 in Lugansk National University named after V. Dahl.

коэффициент формы дефекта по аналитической зависимости и определяется тип дефекта. Он может быть объемный (поры, раковины, неметаллические включения) или плоскостной (трещины, ликвации и др.).
Обсуждение и заключения. В работе предложен двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип дефекта при ручном ультразвуковом контроле литых деталей ПСЖД. Для экспрессного автоматизированного использования предложенного метода разработан программный продукт NDTRT-07.04-L и описан алгоритм работы с ним. Применение данного метода позволяет повысить достоверность и информативность результатов контроля.

analytical dependence; and the type of defect is determined. It can be volume (pores, shells, non-metallic inclusions) or planar (cracks, segregations, etc.).
Discussion and Conclusions. A dual-frequency defectometry method to determine the type of defect under the manual ultrasonic testing of the RRS cast parts is proposed in the paper. For an express automated use of the proposed method, the software product NDTRT-07.04-L is developed, and its operation algorithm is described. The application of the technique can increase the validity and informativity of the test results.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, дефектометрия, форма дефекта, двухчастотный метод, программный продукт, достоверность, информативность.

Keywords: ultrasonic testing, defectometry, defect form, dual-frequency method, software product, validity, informativity.

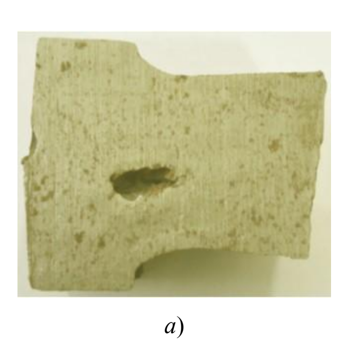
Образец для цитирования: Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог А. Н. Киреев [и др.] Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 335−341. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341

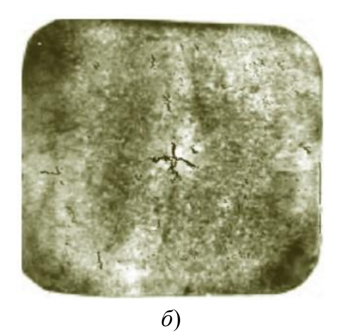
For citation: A.N. Kireev, et al. Validity and informativity enhancement of ultrasonic testing of cast parts of railway rolling stock. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 335−341. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341

Введение. При помощи литейных технологий изготавливают многие ответственные детали экипажной части ПСЖД, например

- дисковые колесные центры тепловозов;
- спицевые колесные центры электровозов и электропоездов;
- боковины тележек грузовых вагонов;
- кронштейны тележек магистральных тепловозов.

Структура литых деталей по технологическим причинам часто имеет дефекты. На рис. 1. представлены некоторые виды внутренних дефектов литья в деталях экипажной части ПСЖД.


а)


б)

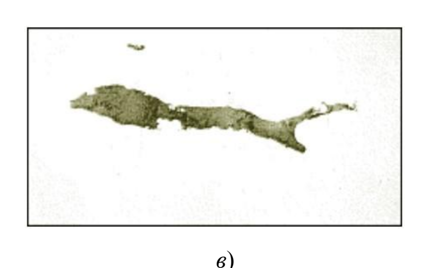

в)

Рис. 1. Дефекты литья в деталях подвижного состава: а — сосредоточенная усадочная раковина в литом колесном центре; б — внутренняя осевая горячая трещина в заготовке оси колесной пары; в — оксидные неметаллические включения в литьевой колесной стали

Степень влияния внутренних дефектов на конструкционную прочность деталей зависит от ряда факторов, таких как:

- условия эксплуатации изделия;
- условия нагружения изделия;
- тип и расположение дефектов в изделии.

Внутренние дефекты в литых деталях ПСЖД могут иметь характер как объемный (поры, раковины, неметаллические включения) (рис. 1, *а*, *в*), так и плоскостной (трещины, ликвации и др.) (рис. 1, *б*). Объемные дефекты уменьшают площадь поперечного сечения детали, за счет чего снижаются ее прочностные свойства. Плоскостные дефекты, нарушающие сплошность металла, концентрируют напряжения на краях и также существенно снижают прочность. Причем, чем более плоскую форму имеет дефект, тем значительнее его влияние. В

этом случае снижение прочности может быть значительно больше, чем от объемных дефектов. Форма дефекта оказывает наибольшее влияние при знакопеременных нагрузках, что зачастую относиться к динамически нагруженным деталям экипажной части ПСЖД.

Максимально снижает долговечность детали дефект, ориентированный перпендикулярно к растягивающим нагрузкам. Худшим случаем является расположение дефекта в максимально нагруженном участке детали. Если направление плоскостного дефекта близко или совпадает с направлением растягивающих усилий, то прочность детали практически не снижается.

Для выявления внутренних дефектов ответственные литые детали ПСЖД при выпуске их из производства подвергаются ультразвуковому эхо-импульсному контролю. Однако классические методики, основанные на сравнении рабочего значения амплитуды эхо-сигнала с эталонным значением этого параметра, позволяют определить допустим ли дефект или нет, но не позволяют определить тип и ориентацию дефекта в детали. Следовательно, требуется повышение достоверности и информативности такого контроля.

Материалы и методы. Эхо-импульсный метод [1–7] ультразвукового неразрушающего контроля основан на регистрации эхо-сигналов от дефектов в объеме детали. При этом на экране ультразвукового дефектоскопа наблюдают посланный (зондирующий) импульс *I* и импульс *III*, отраженный от противоположной поверхности (дна) изделия (донный сигнал). При наличии в теле изделия дефекта наблюдается отраженный от него импульс *II* (эхо-сигнал от дефекта) (рис. 2.). Время прихода импульсов *III* и *II* пропорционально толщине детали и расстоянию от поверхности ввода ультразвуковой волны до дефекта. Если схема контроля является совмещенной (рис. 2), работу излучателя и приемника осуществляет единый преобразователь. Если схема раздельная, применяют два разных преобразователя.

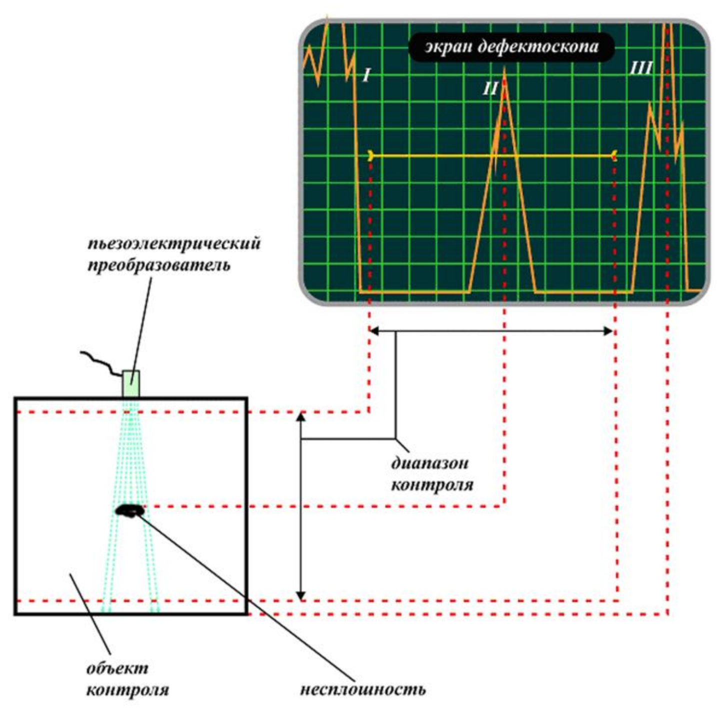


Рис. 2. Схема ультразвукового контроля эхо-импульсным методом

Допустимость несплошностей оценивают путем сравнения амплитуды эхо-сигнала от дефекта с амплитудой эхо-сигнала от эталонного отражателя в стандартном образце предприятия (эквивалентная чувствительность), либо с опорным уровнем чувствительности, настроенном на стандартном образце (мере) СО-2 (рис. 3) [8] с добавлением коэффициента усиления (условная чувствительность) [9].



Рис. 3. Мера СО-2

Стандартный образец предприятия изготавливается из изделия, идентичного объекту контроля по материалу, акустическим свойствам и геометрии. В качестве эталонных отражателей применяют различные виды искусственных отражателей, имитирующих реальные дефекты. Наибольшее распространение при контроле деталей ПСЖД получил плоскодонный цилиндрический отражатель. Это эталонный отражатель в виде плоского дна цилиндрического отверстия, ориентированного перпендикулярно оси цилиндра.

Результаты исследования. Для определения формы дефекта при ручном ультразвуковом контроле литых деталей ПСЖД предложен двухчастотный метод дефектометрии [10–13]. Его сущность в состоит следующем:

1. При обнаружении в объекте контроля эхо-сигнала от дефекта измеряют следующие характеристики на частотах ультразвуковой волны 2,5 МГц и 5,0 МГц:

- амплитуда донных сигналов;
- амплитуда эхо-сигналов от дефекта;
- расстояние от поверхности ввода волны до отражающей поверхности дефекта.

2. Рассчитывают коэффициент формы дефекта по зависимости:

$$v = N_{\text{деф}2,5} - N_{\text{деф}5,0} + N_{\text{д}5,0} - N_{\text{д}2,5},$$

где $N_{\text{деф}2,5}$ — амплитуда эхо-сигнала от дефекта на частоте ультразвуковой волны 2,5 МГц, дБ; $N_{\text{деф}5,0}$ — амплитуда эхо-сигнала от дефекта на частоте ультразвуковой волны 5,0 МГц, дБ; $N_{\text{д}2,5}$ — амплитуда донного сигнала на частоте ультразвуковой волны 2,5 МГц, дБ; $N_{\text{д}5,0}$ — амплитуда донного сигнала на частоте ультразвуковой волны 5,0 МГц, дБ

3. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального плоскостного точечного дефекта по формуле:

$$v_{\text{пл.т.}} = 20\lg\left(\frac{\lambda_{5,0}^2 \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2.5}^2 \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right),$$

где $\lambda_{2,5}$, $\lambda_{5,0}$ — длина ультразвуковой волны, соответственно, на частоте 2,5 МГц, мм и 5,0 МГц, мм; $S_{a2,5}$, $S_{a5,0}$ — площадь пьезоэлектрического преобразователя, соответственно, на частоте 2,5 МГц, мм^2 и 5,0 МГц, мм^2; x — расстояние от поверхности ввода волны до отражающей поверхности дефекта, мм; $x_{\text{д}}$ — расстояние от поверхности ввода волны до донной поверхности, мм.

4. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального объемного точечного дефекта по формуле:

$$v_{\text{об.т.}} = 20\lg\left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right).$$

5. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального плоскостного протяженного дефекта по формуле:

$$v_{\text{пл.пр.}} = 20\lg\left(\frac{\sqrt{\lambda_{5,0}^3} \cdot S_{a2,5}}{\sqrt{\lambda_{2.5}^3} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right).$$

6. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального объемного протяженного дефекта по формуле:

$$v_{\text{об.пр.}} = 20\lg\left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right).$$

7. Определяют тип точечного дефекта:

а) дефект считается плоскостным, если выполняется условие:

$$\nu \le v_{\text{пл.т}} + 0,3\left|v_{\text{об.т}} - v_{\text{пл.т}}\right|;$$

б) дефект считается объемным, если выполняется условие:

$$\nu \ge v_{\text{об.т}} - 0,3\left|v_{\text{об.т}} - v_{\text{пл.т}}\right|.$$

Если не выполняются оба условия, точечный дефект не является плоскостным, однако и не является идеально объемным.

8. Определяется тип протяженного дефекта:

а) дефект считается плоскостным, если выполняется условие:

$$\nu \le v_{\text{пл.пр}} + 0,3\left|v_{\text{об.пр}} - v_{\text{пл.пр}}\right|;$$

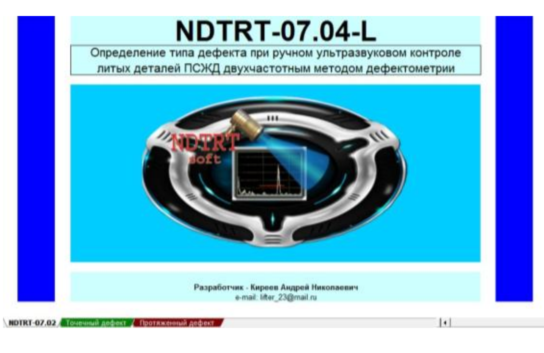
б) дефект считается объемным, если выполняется условие:

$$\nu \ge v_{\text{об.пр}} - 0,3\left|v_{\text{об.пр}} - v_{\text{пл.пр}}\right|.$$

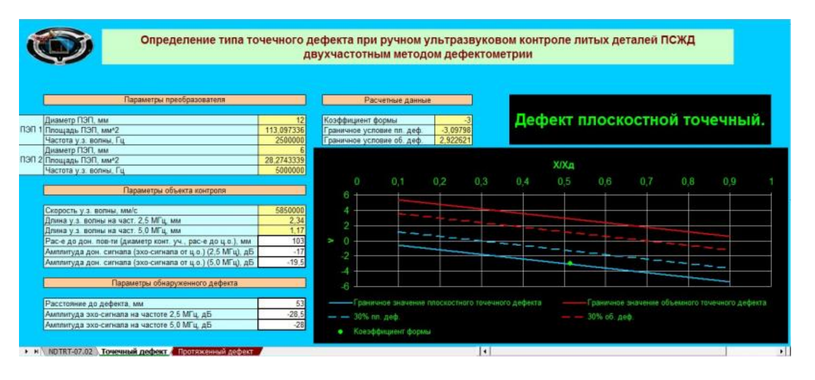
Если не выполняются оба условия, протяженный дефект не является плоскостным, однако и не является идеально объемным.

В методике определения типа как точечного, так и протяженного дефектов для расхождения между фактическими и граничными значениями коэффициента формы объемных и плоскостных несплошностей назначается доверительный интервал 30 %. Этот интервал получен эмпирически в результате проведения экспериментальных исследований, он учитывает методическую и инструментальную погрешности измерений.

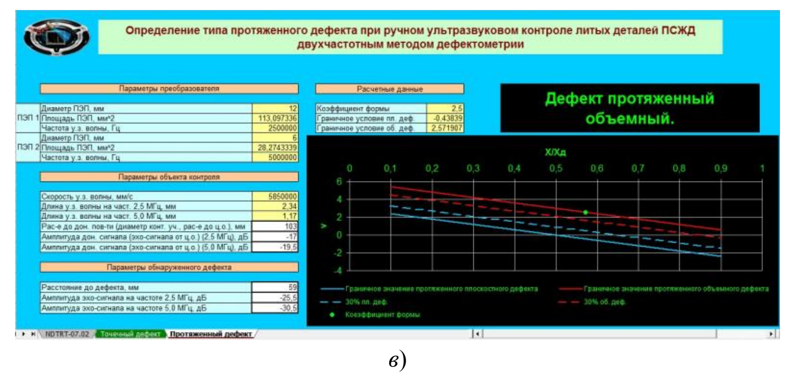
Для быстрого автоматизированного использования двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом контроле литых деталей ПСЖД разработан специальный программный продукт NDTRT-07.04-L. На рис. 4 изображены его рабочие окна.



а)



б)



в)

Рис. 4. Окна программного продукта NDTRT-07.04-L:
а — стартовое окно; *б* — окно «плоскостной дефект»; *в* — окно «объемный дефект»

Работа с программным продуктом NDTRT-07.04-L проводится следующим образом:

1. В соответствующем окне вводят следующие данные при частотах волны 2,5 МГц и 5,0 МГц:
- амплитуды донных сигналов;
- расстояние от поверхности ввода волны до дефекта;
- амплитуды эхо-сигналов от дефекта;
- расстояние до донной поверхности.

2. В соответствующем окне вводят тип дефекта и диаграмму зависимостей граничных условий и доверительного интервала от отношения расстояния до дефекта к расстоянию до донной поверхности.

Обсуждение и заключения. Посредством ручного ультразвукового контроля определяют допустимость внутренних дефектов литых деталей ПСЖД, однако нет возможности определить тип дефекта: объемный или плоскостной. В тоже время тип дефекта значительно влияет на конструкционную прочность изделия. Плоскостные дефекты более опасны, чем объемные, особенно в условиях динамических нагрузок при движении ПСЖД. Значит необходим иной подход к оценке допустимости разных типов дефектов.

Авторами предложен двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип дефекта при ручном ультразвуковом контроле литых деталей, а также повысить достоверность и информативность результатов контроля. Высокая достоверность двухчастотного метода дефектометрии подтвердилась результатами экспериментальных исследований [14].

Для экспрессного автоматизированного использования двухчастотного метода дефектометрии разработан программный продукт NDTRT-07.04-L.

Библиографический список

1. Алешин, Н. П. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый. — Москва : Машиностроение, 1989. — 456 с.

2. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов: Справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. — Москва : Металлургия, 1991. — 752 с.

3. Алешин, Н. П. Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев. — Минск : Высшая школа, 1987. — 264 с.

4. Гурвич, А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. — Киев : Техника, 1972. — 457 с.

5. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов. — Москва : Высшая школа, 1991. — 283 с.

6. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. — Москва : Машиностроение, 1981. — 240 с.

7. Ермолов, И. Н. Физические основы эхо- и теневого метода ультразвуковой дефектоскопии / И. Н. Ермолов. — Москва : Машиностроение, 1970. — 108 с.

8. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые : ГОСТ Р 55724–2013. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 24 с.

9. Киреев, А. Н. Анализ погрешностей применения условной чувствительности при ультразвуковом контроле деталей подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев, М. А. Киреева // Вестник Урал. гос. ун-та путей сообщения. — 2018. — № 2(38). — С. 27–34.

10. Киреев, А. Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев. — Луганск : Ноулидж, 2016. — 147 с.

11. Киреев, А. Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом / А. Н. Киреев // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения. — 2015. — № 2(58). — С. 24–30.

12. Киреев, А. Н. Повышение информативности двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев // Вестник всерос. науч.-исссл. ин-та железнодорожного транспорта. — 2018. — Т. 77, № 3. — С. 182–187.

13. Киреев, А. Н. Визуализация изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев // Вестник всерос. науч.-исссл. ин-та железнодорожного транспорта. — 2017. — Т. 76, № 3. — С. 159–164.

14. Киреев, А. Н. Экспериментальные исследования метода дефектоскопии при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев // В мире неразрушающего контроля. — 2015. — Т. 18, № 4. — С. 72–75.

Сдана в редакцию 23.09.2019
Принята к публикации 28.11.2019

Об авторах:

Киреев Андрей Николаевич,
доцент кафедры «Железнодорожный транспорт» Луганского национального университета имени Владимира Даля, (Украина, 91000, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7548-3348,
lifter_23@mail.ru

Склифус Ярослав Константинович,
доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), (РФ,344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8471-4697,
yaroslav.sklifus@mail.ru

Киреева Маргарита Анатольевна,
ассистент кафедры «Железнодорожный транспорт» Луганского национального университета имени Владимира Даля, (Украина, 91000, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7463-2682,
lifter_23@mail.ru

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 342–348. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 342–348. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62–83: 621.865.8.005.571.11 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-342-348

Обеспечение точностных параметров движения звена промышленного робота в зоне малой скорости[*]

Н. Ф. Карнаухов[1], Д. А. Смяцкий[2], М. Н. Филимонов[3], К. И. Руднев[4]**
[1, 2, 3, 4]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Ensuring of the industrial robot link motion accuracy parameters in the low-speed zone[***]

N. F. Karnaukhov[1], D. A. Smyatsky [2], M. N. Filimonov[3], K. I. Rudnev[4]**
[1, 2, 3, 4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассматривается трение звеньев подвижности промышленного робота (ПР) производственного механизма (ПМ) с частотно-управляемым электроприводом (ЧУЭП). Цель работы — поиск метода снижения влияния такого трения на статическую погрешность (точность) позиционирования рабочего органа (РО) при движении в зоне малой скорости. Случайный характер изменения сил трения при реализации пуско-тормозных режимов работы асинхронного двигателя (АД) создают трудности в достижении заданных параметров технологического процесса. На валу АД формируются пульсирующие моменты, обусловленные гармониками тока статора АД. Это явление в сочетании с моментом трения подвижных звеньев в направляющих ПР (ПМ) сопровождается ухудшением динамики движения РО (выходного звена ПМ).

Материалы и методы. Для корректировки движения РО (выходного звена ПМ) в пуско-тормозных режимах работы АД авторы статьи предлагают использовать двухрежимное управление автономным инвертором напряжения (АИН), обеспечивающее программное управление амплитудами гармоник тока статора АД и соответствующее регулирование пульсирующих моментов на валу АД посредством введения кратной m-подмодуляции несущей частоты (НЧ) АИН.

Результаты исследования. Упрощенное представление структурной схемы ЧУЭП с местной и глобальной отрицательными обратными связями (ООС) позволило выявить особенности влияния конкретных параметров на статическую погрешность δ и динамическую устойчивость работы ЧУЭП с предельным коэффициентом усиления корректирующего усилителя К1.

Обсуждение и заключения. Введение микровибрации ротора АД позволяет условно уменьшать силу трения движущегося звена в направляющих, снижать мощность привода на преодоление сил трения. Применение АИН с двухрежимным управлением расширяет сферу использования ЧУЭП скалярного управления в технологическом оборудовании, многозвенных механизмах автоматизированных производств, работающих в зоне малых и ползучих скоростей.

Introduction. The article is devoted to the search for a method of reducing the effect of friction links mobility industrial robot PR (production mechanism PM) with frequency-controlled electric drive (FCED) on the static error (accuracy) positioning of the working body (WB) when moving in a low speed zone. The random character of friction forces changes in the implementation process start-braking modes of induction motor (IM) operation create difficulties in performance specified technological process parameters. The formation of pulsating moments on the IM shaft, due to the stator IM current harmonics, combined with the friction torque of the moving parts in the IR (IM) guide, accompanied by a deterioration of the WB (IM output link) movement dynamics.

Materials and Methods. To correction the motion of the WB (PM output link) in the IM start-brake modes, the authors proposed to use dual-mode control of the Autonomous voltage inverter (AVI), providing software control of the IM stator current harmonics amplitudes and the corresponding regulation of the pulsating moments on the IM shaft by introducing a multiple "m — submodulation" of the AVI carrier frequency (CF).

Results. The simplified representation of the FCED block diagram with local and global negative feedbacks (GNF) allowed to reveal the features of specific parameters influence on the static error δ and the FCED dynamic stability with the limiting gain of the corrective amplifier K1.

Discussion and Conclusions. The introduction of rotor "micro-vibration", allows the IM "conditionally reduce" the moving link friction force in the guides, reduce the drive power to overcome the friction forces. The use of dual-mode control AVI expands the scope of use of scalar control in process equipment, multi-link mechanisms of automated production, operating in the zone of "low and creeping speeds".



[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: Nfk_609@mail.ru, aid219@mail.ru, maxfil2006@yandex.ru, gloom_z@mail.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: промышленный робот, звено подвижности, сухое трение, частотный асинхронный электропривод, гармоники тока статора, микровибрация ротора, передаточное звено, автоматическая система управления

Keywords: industrial robot, link mobility, dry friction, frequency asynchronous electric drive, harmonics of the stator current, microvibration of the rotor, the transmission link, the automatic control system.

Образец для цитирования: Обеспечение точностных параметров движения звена промышленного робота в зоне малой скорости Н. Ф. Карнаухов [и др.] Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 342−348. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-342-348

For citation: N.F. Karnaukhov, et al. Conditioning of the industrial robot link motion accuracy parameters in the low-speed zone. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 342−348. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-342-348

Введение. Наиболее важные технические параметры промышленного робота (ПР) связаны с выполнением транспортных и технологических операций. При этом учитывается программируемая точность движения рабочего органа (РО), необходимая при сборке соединения, обработке детали и выполнении специальных работ в производственных условиях и при чрезвычайных ситуациях. Достижение программируемой точности движения РО — обычная задача при проектировании кинематической цепи (КЦ) ПР или другого производственного механизма (ПМ), предназначенного для выполнения сложных движений РО кратчайшим, наиболее рациональным путем (например, при обработке, сборке, покраске изделия в условиях замкнутого пространства и других особых случаях, включая техногенные катастрофы). Такая точность ожидаема, если речь идет о ПР с повышенной маневренностью при семи и более степенях подвижности, обеспечиваемых различными сочетаниями звеньев и кинематических пар [1–3]. При этом в КЦ изменяются составляющие векторов сил реакций и моментов для систем координат, жестко связанных с подвижными звеньями. Здесь необходимо учитывать влияние сил трения во вращательных и поступательных кинематических парах (как отдельного звена, так и в целом многозвенного механизма), определяющих общее сопротивление движению РО ПР или ПМ. Силы трения в кинематических парах носят случайный характер, зависят от ряда факторов и определяют механический коэффициент полезного действия, динамику движения многозвенного механизма. Этим обусловлена актуальность поиска способа снижения влияния трения на основные потери в механизме и повышения качества движения РО. Такую задачу необходимо решать и в связи с тем, что указанные выше факторы препятствуют стабильности в отработке системой автоматического управления программируемого технологического режима работы ПР (или закона движения РО) в зоне малой скорости. Особое влияние сил трения проявляется в снижении точности позиционирования РО (как в дискретных, так и непрерывных технологических ПР) в виде погрешности отработки траектории движения многозвенного механизма. Дополнительно следует учитывать составляющие угловых и линейных погрешностей движения звеньев механизма. Они зависят от действительных значений сил (моментов) сухого трения в соединениях и носят случайный характер. Непредсказуемость влияния сухого трения на программируемый результат движения выходного звена ПР (ПМ) существенно ухудшает динамические процессы в частотно-управляемом электроприводе (ЧУЭП) и усложняет задачу коррекции нелинейностей его структурной схемы автоматической системы управления.

С целью уменьшения статической ошибки, обусловленной наличием сухого трения, используют известные подходы [4, 5], в частности:

— местные отрицательные обратные связи (ООС),

— увеличение коэффициента усиления предварительного усилителя (до критического значения всей системы с учетом ее порядка).

Реальное изменение сил (моментов) трения в соединениях многозвенного механизма ПР требует найти наилучшее решение по снижению влияния сухого трения на важнейшие показатели движения РО, на повышение энергоэффективности преобразования электрической энергии в системе частотного электропривода.

Основная задача авторов статьи — ознакомить читателя с возможностями управляемой микровибрации в соединениях трущихся звеньев ПР при особом управлении автономным инвертором напряжения в частотном электроприводе на базе трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД). Автономный инвертор напряжения АИН вводит режим m-подмодуляции несущей частоты — при этом программное влияние на уровень пульсирующего момента на валу АД позволяет менять величину $M_{\text{ТР}}$, улучшать статические и динамические показатели ЧУЭП.

Материалы и методы. Авторы статьи видят решение проблемы в способе использования пульсирующих моментов на валу ротора АД, формируемых гармониками тока статора в схеме ЧУЭП. Такой подход позволяет управлять микровибрацией трущихся звеньев рассматриваемого механизма ПР. При этом в зонах малой скорости момент трогания подвижного звена ПР может программно изменяться до момента скольжения, что

обусловлено уменьшением эффективного коэффициента трения $K_{эф}$ до минимального уровня [5, 6]. Этого можно достичь, регулируя амплитуду пульсирующего момента на валу ротора АД и изменяя эффективный коэффициент трения $K_{ЭФ}$ при двухрежимном управлении АИН [7, 8].

Приведенные положения рассмотрены применительно к структурной схеме многозвенного механизма ПР (в любой системе координат), где можно выделить кинематическую пару горизонтального перемещения подвижного выходного звена РО — например, выдвижную руку с захватным устройством (ЗУ). Звено перемещает индивидуальный ЧУЭП, работающий по системе «АИН — АД» при двухрежимном управлении автономным инвертором напряжения (АИН) [9]. Обоснование возможности изменения силы трения в соединении звеньев (направляющих) можно получить в результате анализа расчетной модели ЧУЭП с выходным звеном подвижности РО ПР (или ПМ) и указанием сил, действующих на него (рис. 1).

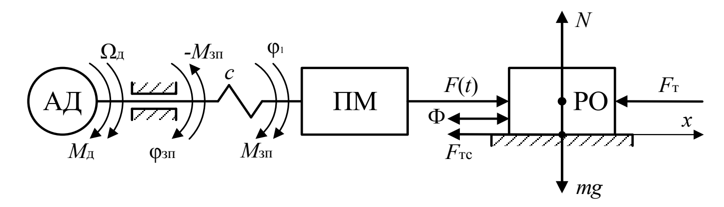


Рис. 1. Расчетная модель звена подвижности производственного механизма

В модели введены следующие обозначения: $M_Д$ — момент двигателя; $\Omega_Д$ — скорость вращения ротора АД; c — жесткость соединения ПМ с АД; $M_{ЗП}$ — движущий момент на входе звена (момент сопротивления — минус $M_{ЗП}$) на валу АД; φ_1 — угол поворота входного звена ПМ (ПР); $\varphi_{ЗП}$ — угол поворота выходного вала АД; $F(t)$ — суммарная (внешняя) движущая сила; $F_{ТС}$ — сила трения в направляющих; $F_Т$ — сила технологического сопротивления; N — сила нормального давления РО с массой m, Ф — вибрационная составляющая суммарной движущей силы $F(t)$.

Уравнение движения звена ПР (ПМ) вдоль продольной оси x:

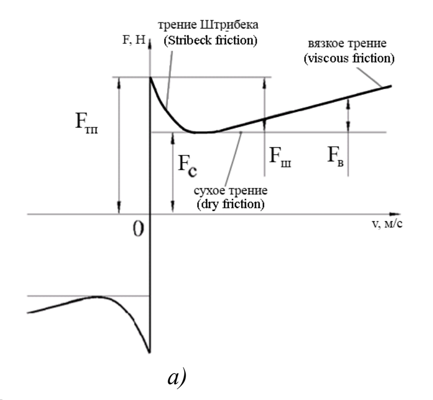
$$m\ddot{x} = F(t) - F_Т - F_{ТС}. \quad (1)$$

Сила трения $F_{ТС}$ в выражении (1) может быть представлена составляющими:

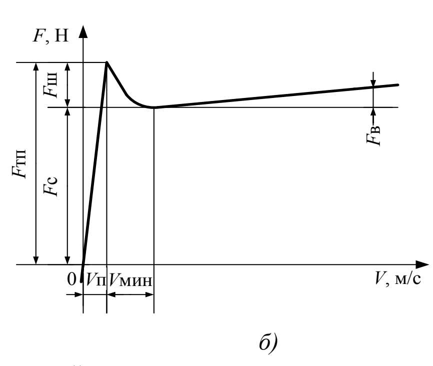
$$F_{ТС} = F_{ТП} = F_Ш + F_С, \quad (2)$$

где $F_{ТП}$ — сила трения покоя, $F_Ш$ — сила трения Штрибека [10], $F_С$ — сила сухого трения.

Соответствующие этим понятиям графические зависимости приведены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Характеристики трения: а — с разрывом в окрестности нулевой скорости движения звена в направляющих, б — без разрыва в окрестности нулевой скорости

С учетом выражения (2), сила трения покоя $F_{ТП}$ в условиях эксплуатации ПР может изменяться в широком диапазоне, т. е. $F_{ТП}/F_С \approx (0{,}1\ldots2{,}5)$. В этом случае для сдвига РО значение внешней (суммарной движущей) силы $F(t)$ должно соответствовать соотношению $F(t) > F_{ТП} + F_Т$ [10]. В действительности характер зависимости силы трения покоя $F_{ТП}$ от скорости (V) перемещения звена подвижности (в зоне малой скорости) различен, и его целесообразно рассматривать на примере неразрывной функции (см. рис. 2, б). Здесь характер изменения силы трения $F_{ТП}$ полностью отражает физические процессы в механическом контакте, распределенном в плоскости между телами — подвижными звеньями ПР, на малом участке скорости, где $V \to 0$. Характеристика Штрибекова трения $F_Ш$ имеет отрицательный наклон в зоне низких скоростей ($V_{МИН}$ — $V_П$) относительного перемещения трущихся тел. Сумма сил $F_Ш + F_С$ на границе диапазона (0 — $V_П$) малой скорости (или в окрестности линейной нулевой скорости) образует силу трения покоя $F_{ТП}$ («силу трения срыва») [11–13]. Для нарушения состояния относительного покоя твердого тела (в соединениях, направляющих движения) часто используют

вибрации тела. Их обеспечивает внешняя сила $F(t) > F_{\text{ТП}}$, обусловленная пульсирующими моментами от гармоник на валу АД [14–17]. Если использовать двухрежимное управление АИН в упрощенной структурной схеме ЧУЭП (рис. 3) с обратной связью по скорости, то можно программно задавать управляемую микровибрацию ротора АД, формировать продольную (поперечную) пульсирующую силу Ф или вибрационную составляющую (см. рис. 1) суммарной движущей силы $F(t)$.

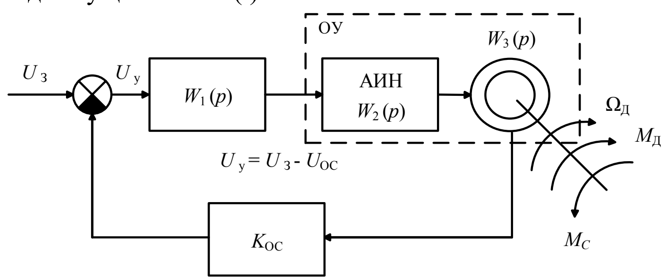


Рис. 3. Упрощенная структурная схема ЧУЭП звена подвижности ПМ

На рис. 3 приняты следующие обозначения: $U_З$ — сигнал задания на управление выходной координатой; $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ — передаточные функции соответственно корректирующего усилительного звена (устройства), автономного инвертора АИН, асинхронного двигателя АД; $K_{\text{ОС}}$ — коэффициент передачи звена обратной связи по скорости; $U_{\text{ОС}}$ — сигнал обратной связи по скорости; $\Omega_{\text{Д}}$ — угловая скорость вращения ротора АД; $M_{\text{Д}}$, $M_{\text{С}}$ — моменты движущих сил и сил сопротивления на валу АД соответственно, включая момент трения $M_{\text{ТР}}$.

Результаты исследования. Замкнутые системы автоматического управления (САУ), охваченные ОС, склонны к неустойчивой работе [18]. Этим объясняется необходимость тщательного анализа параметров каждого элемента контура регулирования при поиске закона управления движением РО как передаточного звена, включая механические подвижные звенья с учетом составляющих момента трения $M_{\text{ТР}}$ (силы покоя $F_{\text{ТП}}$ и силы сухого трения $F_{\text{С}}$) [19]. В многозвенных механизмах с индивидуальным приводом $M_{\text{ТР}}$ может изменяться в широких пределах, что в целом усложняет систему. Можно улучшить качество переходного процесса в приводе, если включить звено с передаточной функцией $W_0(p)$ [4] и таким образом ввести местную ООС с выхода инерционного звена (АД) на его вход (рис. 4).

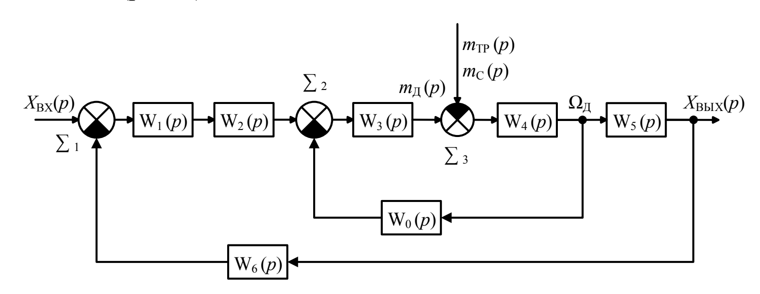


Рис. 4. Преобразованная структурная схема ЧУЭП звена подвижности ПМ

При глобальной ООС по скорости сигнал подается на вход корректирующего усилительного звена с передаточной функцией $W_1(p)$ через сравнивающее устройство (узел Σ_1).

Выделив в структурной схеме прямой участок цепи системы управления с АД, охваченный звеном $W_0(p)$ местной ОС, произведем замену его эквивалентным звеном с передаточной функцией [4, 19]:

$$W_{\text{э}}(p) = \frac{W_4(p) \cdot m_{\text{тр}}(p)}{1 + W'(p)} = \frac{W_4(p) \cdot m_{\text{тр}}(p)}{1 + W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_0(p)}\,.$$

Здесь $W'(p) = W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_0(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы внутреннего контура. При одновременном воздействии всех возмущений (управление на входе и нагрузка при изменении $m_{\text{ТР}}$) результирующее значение $W_{\text{ВЫХ}}(p)$ в линейной системе управления можно представить (по методу наложения) как сумму частных реакций от внешних воздействий.

Если принять соответствие входного сигнала $X_{\text{ВХ}}(p) \to f_1(p)$ как задание частоты тока статора АД, а $X_{\text{ВЫХ}}(p) \to n_{\text{Д}}(p)$ — выходная частота вращения вала механизма, то можно записать результирующее операторное выражение относительно выходной величины в виде

$$X_{\text{вых}}(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_{\text{Э}}(p) \cdot W_5(p) \cdot W_6(p)}{1 + W(p)} \cdot f_1(p) + \frac{W_4(p) \cdot m_{\text{тр}}(p)}{1 + W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_0(p)}\,,$$

где $W(p) = W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot W_Э(p)\cdot W_5(p)\cdot W_6(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы внешнего контура.

При исследовании структурной схемы управления с заданными параметрами элементов силовой цепи можно использовать упрощенные соотношения для передаточных звеньев [20, 21].

— Передаточная функция АИН:

$$W_2(p) = \frac{k_{ПР}}{T_{ПР}\cdot p + 1},$$

где $k_{ПР}$ — коэффициент передачи частотного преобразователя, $k_{ПР} = \frac{U_{1ф}}{f1}$; $T_{ПР} = \frac{1}{f_К}$ — постоянная времени транзисторного преобразователя частоты (АИН); $f_К$ — значение несущей частоты модуляции (3–50 кГц); $U_{1ф}$, f_1 — соответственно напряжение и частота тока фазы АД.

— Передаточная функция АД по управляющему воздействию:

$$W_3(p) = \frac{n_Д}{f_1(p)} = \frac{k_Д}{T_{МЭ}T_{ЭМ}p^2 + T_{МЭ}p + 1},$$

где параметр $f_1(p)$ определяется из соотношения $f_1 = \frac{f_{1н}}{D}$ Гц при расчетном диапазоне D — регулирования АД; $f_{1Н}$ — номинальная частота напряжения АД; $k_Д$ — передаточный коэффициент АД; $k_Д = 60/p$, где p — число пар полюсов АД.

— Передаточная функция асинхронного двигателя по возмущающему воздействию от статического момента $m_С$ нагрузки:

$$W_3(p) = -\frac{n_Д(p)}{m_С(p)} = -\frac{\frac{60}{2\pi}\cdot\frac{1}{k_{ЖЭ}}(T_{эм}p + 1)}{T_{МЭ}T_{ЭМ}p^2 + T_{МЭ}p + 1}.$$

Здесь

$$k_{ЖЭ} = \frac{3U_{1ф}^2 p^2\cdot\frac{R_2'}{S_2}}{4f_1^2\pi^2[(R_1 + R_{1доб} + \frac{R_2'}{S_2}) + X_К^2]},$$

где R'_2 — приведенное активное сопротивление ротора к статору; S — расчетное скольжение; $X_К$ — суммарное индуктивное сопротивление статора и ротора; R_1 — номинальное активное сопротивление фазы обмотки статора АД; $R_{1доб}$ — расчетное активное сопротивление обмотки статора АД в режиме коррекции вольт-частотной характеристики [18, 19]; $T_{МЭ} = \frac{4\pi^2 f_1^2 J_D R_2'}{3U_{1ф}^2 p^2}$ — электромеханическая постоянная времени АД; J_D — приведенный момент инерции привода; $T_{ЭМ} = \frac{X_к}{2\pi f_1 R_2'}$ — электромагнитная постоянная времени АД.

Передаточную функцию АД при воздействии внешнего момента трения $M_{ТР}$ можно представить соответствием формирования электромагнитного момента АД току ротора. При этом остается неизменным магнитный поток статора ($Ф_С$ = const) как передаточный коэффициент $k_{МЭ}$, рассчитываемый из соотношения

$$W_4(p) = k_{мэ} = \frac{3p\cdot k_{пр}}{2\pi}.$$

С учетом приведенного момента инерции нагрузки развиваемый динамический момент $M_{ДИН}$ на валу АД в переходном режиме работы ЧУЭП можно представить соотношением

$$J_D\cdot\frac{\partial\Omega_д}{\partial t} = M_д - (M_с + M_{тр}), \tag{3}$$

где $M_Д$ — электромагнитный момент АД.

В узле Σ_3 условно осуществляется решение правой части уравнения (3) при введении управления АИН в режиме m-подмодуляции. Это позволяет программно изменять заданный момент трения $M_{ДИН}$ (или момент трогания) за счет изменения амплитуды пульсирующего момента на валу АД. В многозвенных механизмах ПР момент трения (трогания) может изменяться в 1,5–2,5 раза и более в сравнении с моментом сухого трения. Единицы измерения частоты вращения вала (из рад/с в об/мин) преобразуются посредством передаточной функции

$$W_5(p) = k_{ск} = \frac{n_0}{\Omega_0},$$

где n_0, Ω_0 — частота вращения вала АД в об/мин и рад/с соответственно.

Звено 6 структурной схемы является безынерционным. Оно характеризует естественную обратную связь по наведенной противо-ЭДС АД. В этом случае расчетный коэффициент передачи $k'_Э$ составит

$$W_6(p) = k'_Э,$$

где

$$k'_Э = \frac{f_1}{\frac{60 f_1}{p}} = \frac{p}{60}.$$

Выполненные преобразования позволяют представить общий коэффициент усиления системы $k_У$ ЧУЭП через соответствующие коэффициенты отдельных звеньев:

$$k_У = k_1 \cdot k_{ПР} \cdot k_Д \cdot k_{МЭ} \cdot k_{СК} \cdot k'_Э.$$

Статическая ошибка δ, обусловленная моментом сухого трения $M_{ДИН}$, в замкнутых системах может быть уменьшена введением в систему местных параллельных и последовательных скоростных обратных связей, что видно из соотношения [4, 5, 20]

$$\delta = \frac{M_{тр} k_{мэ}}{k_1 k'_Э},$$

где k_1 — коэффициент усиления усилителя корректирующего звена (например, при включении ПИД-регулятора); $k'_Э$ — коэффициент усиления датчика скорости.

Однако увеличение k_1 больше некоторого значения сопровождается ростом $k_У$ и при некотором критическом значении $k_У \geq k_{КР}$ в приводе возможны автоколебания, потеря устойчивости. В этом случае $k_{КР}$ в $(1+ k_У)$ раз выше, чем в системе без обратной связи. Это уменьшает статическую ошибку системы δ дополнительно с уменьшением момента $M_{ДИН}$ при введении управляемой микровибрации вала АД в режиме m-подмодуляции работы АИН.

Обсуждение и заключения. По итогам исследования можно сделать два заключения.

1. Применение двухрежимного управления автономным инвертором напряжения в ЧУЭП позволяет улучшить технические характеристики промышленного робота в зоне малой скорости движения рабочего органа.

2. Использование программно управляемой микровибрации ротора асинхронного двигателя ЧУЭП:
— обеспечивает снижение момента трения (трогания) в многозвенных подвижных механизмах;
— уменьшает уровень статической ошибки системы в 1,5–2,5 раза при сниженном коэффициенте усиления корректирующего усилителя;
— повышает устойчивость системы в динамических режимах управления.

Библиографический список

1. Лукинов, А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 608 с.

2. Теория механизмов и механика машин / К. В. Фролов [и др.] ; под ред. К. В. Фролова. — Москва : Высшая школа, 2005. — 496 с.

3. Зотеев, В. Е. Параметрическая идентификация диссипативных механических систем на основе разностных уравнений / В. Е. Зотеев. — Москва : Машиностроение, 2009. — 344 с.

4. Каширских, В. Г. Теория автоматического управления. В 2 ч. Ч. 2. Нелинейные и специальные системы / В. Г. Каширских. — Кемерово : КузГТУ, 2004. — 98 с.

5. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. — Москва : Академия, 2006. — 273 с.

6. Карнаухов, Н. Ф. Моделирование сухого трения звена производственного механизма с частотным приводом в зоне малой скорости / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Д. А. Смяцкий // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. — 2018. — № 2. — С. 140–149.

7. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования циклических режимов частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, А. И. Изюмов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2012. — № 6 (67). — С. 76–86.

8. ГОСТ32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / ООО «ЛИНВИТ» ; Технический комитет по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств» ; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) ; Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 16 с.

9. Филимонов, М. Н. Двухрежимное управление автономным инвертором напряжения частотного привода производственного механизма в зоне малой скорости / М. Н. Филимонов, Н. Ф. Карнаухов, Д. А. Смяцкий // Известия вузов. Электромеханика. — 2018. — Т. 61, № 2. — С. 70–76.

10. Abdo, J. The Effect of Frequency and Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Metals / J. Abdo, M. Tahat // Tribology International. — April 2008. — Vol. 41, iss. 4.— P. 307–314.

11. Пановко, Я. Г. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий / Я. Г. Пановко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 192 с.

12. Olsson, H. Friction Models and Friction Compensation / K. J. Aström, C. Canudas-de-wit, M. Gäfvert, and P. Lischinsky // European Journal of Control. — 1998. — Vol. 4, iss. 3. — P. 176–195.

13. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. — Ижевск : РХД, 2009. — 414 с.

14. Zheng Xu. Study of Five-level diodes-clamped Inverter Modulation Technology Based on Three-harmonic Injection Method / Zheng Xu, Song Li, and Hongying Pan. — EMEIT-2012. — P. 1973–1976.

15. Dahidah, M.S.A. Selective harmonic elimination PWM control for cascaded multilevel voltage source converters: A generalized formula / M.S.A. Dahidah and V.G. Agelidis // IEEE Trans. on Power Electronics. — 2008. — Vol. 23, no. 4. — P. 1620–1630.

16. N. Van Nho. A Simple On-line SHE PWM With Extension to Six Step Mode in Two-Level Inverters / N. Van Nho & M. J. Youn // International Conference on Power Electronics and Drives Systems, PEDS 2005. — Nov. 2005. — Vol. 2. — P. 1419 – 1424. — Режим доступа : https://ieeexplore.ieee.org/document/1619911 (дата обращения : 04.11.2019).

17. Wanchai Subsingha. A Comparative Study of Sinusoidal PWM and Third Harmonic Injected PWM Reference Signal on Five Level Diode Clamp Inverter/ Wanchai Subsingha. — Energy Procedia. — June 2016. —Vol. 89. — P. 137–148.

18. Поздеев, А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А. Д. Поздеев. — Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. — 172 с.

19. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. — Москва : МЭИ, 2015. — 373 с.

20. Карнаухов, Н. Ф. Частотно-управляемый асинхронный электропривод мехатронных систем. Основы расчета и проектирования / Н. Ф. Карнаухов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2009. — 229 с.

21. Лопухина, Е. М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Е. М. Лопухина, Г. А. Семенчуков. — Москва : Высшая школа, 2002. — 511 с.

Сдана в редакцию 26.06.2019
Принята к публикации 05.09.2019

Об авторах:

Карнаухов Николай Федорович,
профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0625–2973,
Nfk_609@mail.ru

Филимонов Максим Николаевич,
старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника», заместитель декана факультета «Автоматизация, мехатроника и управление» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–2807–9171,
maxfil2006@yandex.ru

Смяцкий Дмитрий Андреевич,
аспирант, инженер кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000–0002–7772–1039,
aid219@mail.ru

Руднев Константин Игоревич,
студент 3-го курса кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000–0002–8485–3873,
gloom_z@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.927.5:621.646.1 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-349-356

Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения*

С. С. Полосков[1**]
[1]Московский областной государственный университет, Москва, Российская Федерация

Problems of weld overlay of seating surfaces of pipe fitting and solutions***

S. S. Poloskov[1**]
[1]Moscow Region State University, Moscow, Russian Federation

Введение. Рассматривается проблема обеспечения необходимых функций трубопроводной арматуры по перекрытию, регулированию, распределению потоков рабочей среды в крайне неблагоприятных условиях эксплуатации нефтегазовых трубопроводов, связанных с наличием в углеводном сырье абразивных частиц, механических примесей, сероводорода, углекислого газа и органических кислот с сульфато-восстанавливающими бактериями.
Материалы и методы. Высокие эксплуатационные свойства уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры обеспечивает антикоррозионная наплавка легированных и высоколегированных металлов на основе железа с добавлением хрома, никеля, кобальта и ниобия. Проанализированы основные методы наплавки: дуговой наплавки покрытыми электродами, неплавящимся и плавящимся электродами в защитных газах, дуговой наплавки под флюсом. Отмечены преимущества и недостатки реализуемых в последние годы способов наплавки: лазерной, плазменно-порошковой и плазменно-дуговой.
Результаты исследования. С учетом возможностей автоматизации предложен высокотехнологичный процесс роботизированной антикоррозионной наплавки плавящимся электродом с подачей дополнительной присадочной проволоки в переднюю часть сварочной ванны для экранирования теплового воздействия дуги. Промышленное применение предлагаемой технологии требует проведения комплекса исследований, связанных с оценкой влияния технологических параметров на качество наплавляемых слоев для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик арматуры.
Обсуждение и заключение. Вышеуказанные исследования предложено выполнять с применением физико-математического моделирования процесса антикоррозионной наплавки, сокращающего время и количество экспериментов. Поэтому первоочередной задачей является разработка математической модели

Introduction. A problem of providing the necessary functions of pipe fitting for blockage, control, distribution of the working medium flows under the most adverse operating conditions of oil and gas pipelines associated with abrasive particles, mechanical impurities, hydrogen sulfide, carbon dioxide and organic acids with sulfate-reducing bacteria, is considered.
Materials and Methods. High performance properties of seating surfaces of pipe fittings are provided through anticorrosive plating of alloyed and high-alloyed metals based on iron with the addition of chromium, nickel, cobalt and niobium. The basic weld overlay methods are analyzed: metal-arc welding, nonconsumable and consumable-electrode weld facing in shielding gases, submerged arc surfacing. Advantages and disadvantages of surfacing methods implemented in recent years are noted: laser, plasma-powder and plasma-arc methods.
Research Results. Taking into account the automation capabilities, a high-tech process of robotic anticorrosive surfacing using a consumable electrode with an additional filler metal feed to the front welding puddle for shielding the thermal effect of the arc, is proposed. Industrial application of the proposed technology requires a set of studies related to assessing the effect of technological parameters on the quality of the deposited layers to provide the required operational characteristics of the fitting.
Discussion and Conclusion. It is proposed to carry out the above studies using physical and mathematical modeling of the anticorrosive surfacing, which reduces the time and number of experiments. Therefore, the primary task is to develop a mathematical model of the surfacing process with a



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: stanislavpoloskov@gmail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

процесса наплавки плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой и поперечными колебаниями наплавочной горелки. Такая модель должна виртуально воспроизводить процесс наплавки, а также его термический цикл с последующим расчетом соотношения структурных составляющих наплавленного металла и металла подложки. Система уравнений модели должна решаться специальной компьютерной программой. Представленный алгоритм решения данного класса задач позволит установить четкую взаимосвязь между технологическими параметрами процесса наплавки и показателями качества формирования наплавляемых слоев, определить программу их оптимизации для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств трубопроводной арматуры.

consumable electrode with an additional filler wire and transverse vibrations of the welding burner. Such a model should virtually reproduce the surfacing process, as well as its thermal cycle followed by calculating the ratio of the structural components of the deposited metal and the substrate metal. The system of equations of the model should be solved by a special computer program. The algorithm presented for solving this class of problems will allow us to make a sound connection of the technological parameters of the surfacing process and the quality parameters of the formation of the deposited layers, to determine the program for their optimization to provide the required operational properties of pipeline fitting.

Ключевые слова: антикоррозионная наплавка, затворный узел, трубопроводная арматура, математическая модель наплавки, плавящийся электрод, присадочная проволока.

Keywords: anticorrosive surfacing, stop valve, pipeline fitting, mathematical model of surfacing, consumable electrode, filler wire.

Образец для цитирования: Полосков, С. С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения / С. С. Полосков // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №4. — С. 349−356. https://doi.org/ 10.23947/ 1992-5980-2019-19-4-349-356

For citation: S.S. Poloskov. Problems of weld overlay of seating surfaces of pipe fitting and solutions. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 349−356. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-349-356

Введение. Россия не только располагает крупнейшей ресурсной базой, но и колоссальным опытом в создании и эксплуатации её инфраструктуры. Важнейшим элементом инфраструктуры является разветвленная сеть трубопроводов для транспорта нефти, газа и продуктов их переработки, так как месторождения нефти и газа в России и их потребители разнесены географически на огромные расстояния [1]. Это требует решения целого ряда задач, первоочередной из которых является управление доставкой углеводородного сырья потребителям. Однако оперативно-диспетчерское управление потоками сырья в трубопроводах невозможно без соответствующей арматуры. Необходимые запорно-регулирующие функции нефтегазовой арматуры обеспечивает ее затворный узел, который, в зависимости от своего назначения, создает условия по перекрытию, регулированию, распределению потоков рабочей среды путем изменения своего проходного сечения.

По способу остановки потока и конструктивным особенностям затворного узла все виды трубопроводной арматуры классифицируются на вентили, задвижки и шаровые краны. Их конструктивные различия (рис. 1) наглядно показаны в работе [2]. Затворный узел арматуры, как правило, состоит из двух контактных элементов — седла и затвора.

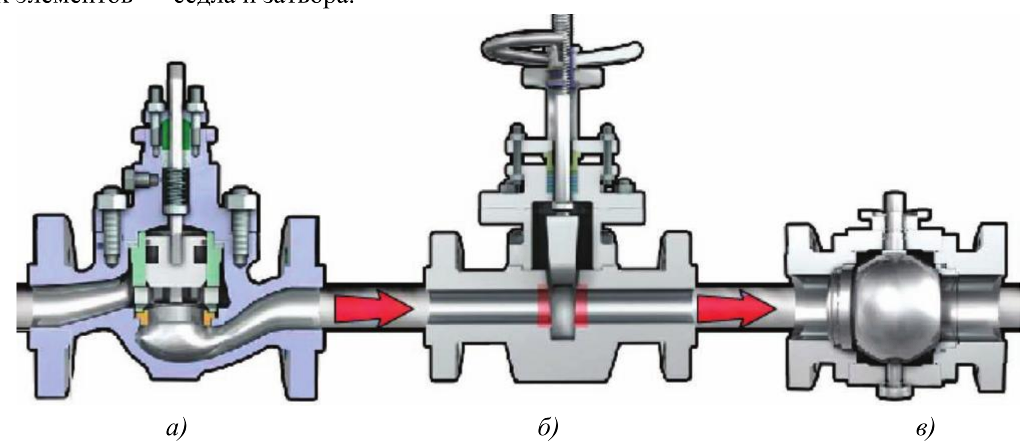


Рис. 1. Конструктивные особенности затворных узлов трубопроводной арматуры: а — вентиль; б — задвижка; в — шаровой кран [2]

В вентилях (рис. 1 а) затвор перемещается вдоль движения потока рабочей среды; в задвижках (рис. 1 б) затвор движется перпендикулярно потоку рабочей среды; в кранах запирающий элемент

поворачивается вокруг оси устройства перпендикулярно потоку рабочей среды. В зависимости от формы тела вращения краны бывают конусные, цилиндрические и шаровые. Схема функционирования шаровых кранов представлена на рис. 1 в. Как правило, уплотнение в затворе осуществляется по схеме «металл-металл». Следует отметить, что именно шаровые краны обеспечивают минимальное сопротивление потоку в открытом положении, обладают большей скоростью открывания/закрывания, наибольшим сроком безотказной эксплуатации [3].

Транспортировка углеводного сырья характеризуется высокими давлениями как в самих трубопроводах, так и в трубопроводной арматуре. Помимо этого, добыча и переработка углеводородов неизменно сопряжена с транспортировкой по трубопроводным системам сырья, содержащего абразивные частицы и механические примеси. Перемещаемая среда может также содержать сероводород (H_2S) и углекислый газ (CO_2). Помимо этого, при транспорте нефтяного сырья на контактных поверхностях арматуры может образовываться конденсат, содержащий органические кислоты и сульфато-восстанавливающие бактерии. В настоящее время активно развивается индустрия сжижения газа, где все процессы происходят при крайне низких температурах. Низкие температуры также создают определенные проблемы при эксплуатации арматуры.

Материалы и методы. С учетом перечисленных условий эксплуатации конструкция запорного узла должна исключать заклинивание затворов и обеспечивать их необходимую стойкость к коррозии и гидроабразивному износу. Зачастую такие требования обеспечивают наплавкой износо- и коррозионностойкими материалами. Однако многие проблемы импортозамещения подобной продукции сдерживаются из-за нерешенности ряда вопросов по реализации процессов наплавки. Это актуализирует необходимость совершенствования технологий антикоррозионной наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры.

Известно, что корпусные детали и детали узла затвора трубопроводной арматуры изготавливают из нелегированных, легированных и высоколегированных сталей, заготовки для которых получают прокатом, литьем или штамповкой [4]. Исходными данными, определяющими выбор конкретных материалов для арматуры являются условия, при которых она будет эксплуатироваться. Важным является изменение свойств металла в процессе длительной эксплуатации. Следует отметить, что зачастую при изготовлении деталей и узлов трубопроводной арматуры используют более дешевые нелегированные стали, а требуемые антикоррозионные свойства уплотнительных поверхностей обеспечивают наплавкой легированных и высоколегированных металлов. Поэтому в настоящее время наплавка является приоритетным направлением обеспечения требуемых эксплуатационных свойств уплотнительных поверхностей арматуры. В зависимости от условий эксплуатации арматуры применяют наплавочные материалы на основе железа с добавлением хрома, никеля, кобальта и ниобия.

Так как главным требованием к антикоррозийной наплавке является ее стойкость против сероводородного растрескивания и углекислотной коррозии, то это требование достигается обоснованным подбором материалов, способов наплавки и их режимов. В настоящее время при наплавке поверхностей трубопроводной арматуры наиболее распространены дуговая наплавка покрытыми электродами, наплавка неплавящимся электродом с присадочной проволокой, механизированная наплавка в защитных газах и дуговая наплавка под флюсом [5]. Перечисленные технологии наплавки обладают как целым рядом достоинств, так и определенными недостатками. Наплавке штучным электродом присуще значительное количество дефектов, требующих дополнительных затрат на их устранение. Ручная аргонодуговая наплавка, обеспечивающая самое высокое качество наплавляемых слоев, характеризуется относительно низкой производительностью. Для ее реализации требуются сварщики высокой квалификации. Механизированная наплавка плавящимся электродом в среде защитного газа более производительна, однако регулирование тепловложения и соотношения долей подложки и электродного материала затруднено. Помимо этого, всем перечисленным технологиям присуще подплавление основного металла и значительное термическое воздействие на него, что является существенным недостатком. Следует отметить, что при реализации любых способов ручной или механизированной наплавки невозможно добиться равномерности толщины наплавленного слоя. Наплавка под слоем флюса имеет ограничения, так как позволяет наплавлять только простые, практически плоские поверхности.

Повышение производительности и качество выполняемых работ обеспечивает автоматизация процессов наплавки. Автоматическая наплавка неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки обеспечивает непрерывность процесса с эффективным регулированием долей металла подложки в наплавленном слое. При этом требуется постоянный контроль за состоянием неплавящегося электрода, так как при износе его рабочей поверхности проплавляющая способность дуги резко снижается. В свою очередь, при

более производительной автоматической наплавке плавящимся электродом, даже с подачей дополнительной присадочной проволоки [6], сложнее добиваться минимального проплавления основного металла.

В последние годы покрытия на трубопроводной арматуре выполняют лазерной и плазменной наплавкой с присадочным металлом в виде порошка или присадочной проволоки [7, 8], газопламенного напыления. Лазерная наплавка имеет целый ряд преимуществ, так как она обеспечивает минимальное тепловое воздействие на подложку. Существенным недостатком лазерной наплавки с присадкой в виде порошка является его нерациональное использование, так как он частично не попадает под лазерный луч и остается неиспользованным. В случае использования присадочной проволоки возникают проблемы с ее плавлением, обусловленные требованиями по точности наведения под луч. К сожалению, плазменно-порошковая наплавка имеет схожие проблемы по использованию порошковых материалов. Замена порошка на присадочную проволоку создает проблемы по ее усвоению наплавочной ванной. Комбинированная плазменно-дуговая наплавка характеризуется сложностью синхронного управления разнородными источниками тепла. Как отмечает целый ряд авторов, при газопламенном напылении зачастую наблюдается повышенная пористость и характерные сколы напыляемого металла.

Поэтому для антикоррозионной наплавки трубопроводной арматуры требуются новые технические решения, использующие уже апробированные на практике технологии и средства автоматизации. Сейчас в парке промышленных роботов промышленно развитых стран большинство составляют роботы, воспроизводящие движения рук человека при выполнении технологических операций. Использование таких роботов для перемещения наплавочной горелки смогло бы не только снизить требования к квалификации сварщиков, но и уменьшить их субъективное влияние на качество работ [9].

Результаты исследования. С учетом возможностей автоматизации, таким перспективным путем мог бы стать высокотехнологичный процесс роботизированной наплавки плавящимся электродом с подачей дополнительной присадочной проволоки в переднюю часть сварочной ванны для экранирования теплового воздействия дуги (рис. 2).

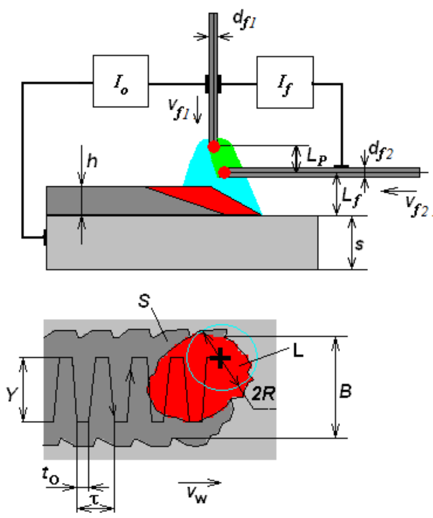


Рис. 2. Схема процесса наплавки плавящимся электродом с подачей присадочной проволоки и поперечными колебаниями горелки: I_o, I_f — токи основной и дополнительной дуги; R — радиус факела дуги; s — толщина подложки; d_f, v_f — диаметр и скорость подачи проволок; Y, t_o, τ — параметры поперечных колебаний; L, S — расплав и наплавленный слой

По мнению авторов, такой способ наплавки обладает достаточно широкими технологическими возможностями регулирования тепловложения и проплавления в более широких пределах, так как позволяет использовать наработки по управляемому каплепереносу электродного металла [10] и созданию оптимальных условий плавления присадочной проволоки [11]. Помимо этого, возможность поступления через присадочную проволоку наноструктурируемых добавок, активно изучаемых в настоящее время, улучшат микроструктуру и свойства наплавленного металла. Разумеется, лучшее усваивание наплавочной ванной присадочной проволоки обеспечит ее сопутствующий подогрев. Как отмечается в работе [12], для формирования более широких слоев за меньшее число проходов при малой интегральной скорости наплавки целесообразно использовать поперечные колебания горелки. Такие колебания снизят вероятность формирования закалочных структур, инициирующих проявления очагов коррозии. Однако в полной мере использовать подобные разработки могут только высокотехнологичные наукоемкие предприятия, стремящиеся усилить свои преимущества в

конкурентной среде [13]. К сожалению, промышленному применению предлагаемого процесса антикоррозионной наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры мешает целый рад нерешенных проблем (рис. 3).



Рис. 3. Проблемы промышленного использования наплавки плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой

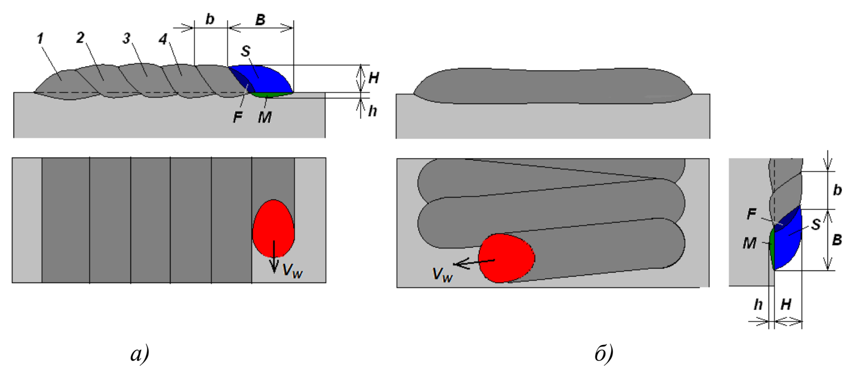
Для решения вышеперечисленных проблем и успешной реализации предлагаемого процесса антикоррозионной наплавки необходима разработка научно обоснованной методической и программно-математической базы анализа и прогнозирования качества наплавляемых поверхностей. Решение задачи оптимизации предлагаемой технологии наплавки осложнено большим количеством параметров: скоростью наплавки и подачи проволоки, ее диаметром, напряжением и током дуги, амплитудой, периодом и формой колебаний, исходной температурой подложки. Важны и показатели качества: размеры и форма наплавляемого слоя, глубина проплавления и толщина наплавки, химический состав наплавленного металла, свойства наплавленного слоя. Следует также учитывать, что оптимизация технологии наплавки требует проведения большого количества экспериментов, в большинстве случаев, весьма сложных и дорогостоящих.

В настоящее время среди современных методов исследования процессов сварки и наплавки, сокращающих время и количество экспериментов, выделяют физико-математическое моделирование. Эффективность процессов наплавки на основе компьютерного моделирования показана в целом ряде работ [14, 15]. Так, в работе [14] выполнен анализ упрочняющей наплавки с использованием физико-математического моделирования. Моделированием определена оптимальная глубина проплавления и ширина наплавочной ванны при которых минимизируется перемешивание наплавляемого металла. К сожалению, в этой работе не рассмотрены условия гарантированного обеспечения содержания основного металла менее 2–5% в завершающем слое.

Задачи разработки технологии наплавки методами компьютерного инженерного анализа формализованы в работе [15], в которой рассмотрена технология плазменной наплавки кольцевых слоёв из меди на стальные трубные заготовки с поперечными колебаниями плазмотрона. Однако результаты данной работы неприменимы для антикоррозийной наплавки покрытий, а сам процесс существенно отличается от наплавки плавящимся электродом.

При наплавке сталей, содержащих тугоплавкие металлы, на низко- и среднелегированные стали, сложно избежать формирования закалочных структур и возникновения трещин. Оценить вероятность формирования закалочных структур позволяют статистические модели, описанные в работах [16, 17]. Подходы и результаты данных работ могут быть частично использованы для оценки свойств наплавленного металла и подложки.

Обсуждение и заключение. Приведенные примеры показывают, что существующие достижения в компьютерном моделировании процессов сварки и наплавки не могут решить проблемы по промышленному внедрению предлагаемой технологии антикоррозионной наплавки. Поэтому первоочередной задачей является разработка математической модели процесса антикоррозионной наплавки плавящемся электродом в защитном газе с дополнительной присадочной проволокой и с поперечными колебаниями наплавочной горелки. Модель должна обеспечить виртуальное воспроизведение плавления электродов заданных диаметров при заданных скоростях подачи, формирование наплавочной ванны под действием теплового и силового воздействия дуги и потока электродных капель, а также воспроизведение термического цикла с последующим расчётом соотношения структурных составляющих наплавленного металла и металла подложки. Система уравнений модели может быть решена численными методами, для чего должна быть создана специальная компьютерная программа. Такая программа должна обеспечить воспроизводство многопроходной наплавки с учетом его характерных размеров наплавляемых слоёв (рис. 4), что требует моделирования последовательности их укладки.



а) *б)*

Рис. 4. Характерные размеры при наплавке покрытий ниточными швами (а) и с поперечными колебаниями (б): 1…4 — номера валиков, V_w — направление движения горелки; B — ширина ванны; b — шаг дуги; h — глубина проплавления; H — высота наплавки; S, F, M — площади наплавки, оплавления предыдущего валика и расплава подложки

Важной проблемой является обеспечение адекватности моделирования — соответствие экспериментальным данным. При наличии адекватной модели можно оценивать влияние параметров на показатели качества формирования наплавочных валиков, в первую очередь, на химический состав, геометрические размеры и механические свойства каждого наплавленного валика.

Алгоритм последовательности решения задач по определению параметров процесса антикоррозионной наплавки плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой представлен на рис. 5.

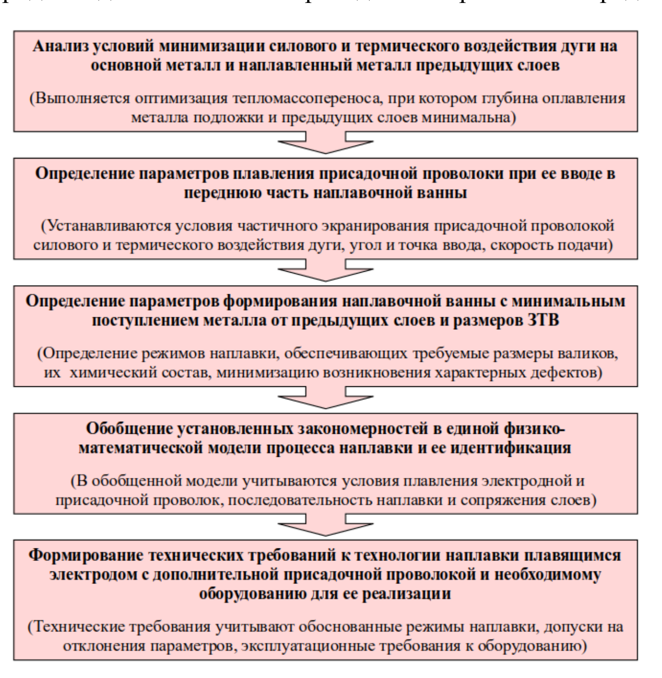


Рис. 5. Алгоритм последовательности решения задач по оптимизации процесса наплавки плавящимся электродом

Практическая реализация предложенного алгоритма позволит установить четкую взаимосвязь между технологическими параметрами процесса антикоррозионной наплавки и показателями качества формирования наплавляемых слоев, определить программу их оптимизации для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств трубопроводной арматуры. В свою очередь определение оптимальных параметров наплавки поможет сформировать более обоснованные технологические требования к предлагаемой технологии наплавки и выбору необходимого роботизированного оборудования для ее реализации.

Несомненно, при таком системном подходе выявленные проблемы разработки и внедрения технологии наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой в ближайшее время будут успешно решены, что позволит гарантированно обеспечить необходимые эксплуатационные свойства столь важного регулирующего элемента нефтегазового оборудования.

Выводы

1. Перспективным путем обеспечения требуемых эксплуатационных свойств трубопроводной арматуры при существенном увеличении производительности и качества наплавочных работ при ее изготовлении является внедрение в производство технологий антикоррозионной наплавки плавящимся электродом с подачей дополнительной присадочной проволоки.

2. Для промышленного применения предлагаемой технологии наплавки необходимо проведение комплекса исследований, направленных на оценку влияния технологических параметров на качество формирования наплавляемых слоев и обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик трубопроводной арматуры.

3. Имеющиеся методики моделирования процессов наплавки не могут решить проблемы по промышленному внедрению технологии наплавки плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой. Это обстоятельство обуславливает необходимость разработки оригинальной математической модели процесса наплавки, обеспечивающей его виртуальное воспроизведение при формировании наплавочной ванны, а также термического цикла наплавки с расчётом соотношения структурных составляющих наплавленного металла и металла подложки, химического состава наплавляемых слоев.

Библиографический список

1. Никонова, А. А. Нефтегазовые ресурсы России: оценки и перспективы развития топливно-энергетического комплекса / А. А. Никонова // Экономический анализ : теория и практика. — 2017. — № 11. — С. 2064–2082.

2. Valve technology: handbook. - Stavanger: Norwegian Oil and Gas Association, 2017. — 131 p.

3. Barker, G. The engineer's guide to plant layout and piping design for the Oil and Gas Industries / G. Barker. — Houston: Gulf Professional Publishing, 2018. — 532 p.

4. Шпаков, О. Н. Трубопроводная арматура: справочник специалиста / О. Н. Шпаков. — Санкт-Петербург : КХТ, 2007. — 463 с.

5. Saha, M. K. A review on different cladding echniques employed to resist corrosion / M. K. Saha, S. Das // Journal of the Association of Engineers. — 2016. — Vol. 86, № 1–2. — P. 51–63.

6. Исследование процесса аргонодуговой наплавки плавящимся электродом с подачей присадочной проволоки / А. А. Антонов [и др.] // Известия ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. — 2016. — № 2 (181). — С. 132–135.

7. Татаринов, Е. А. Лазерная наплавка элементов запорной арматуры / Е. А. Татаринов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2015. — № 11–1. — С. 101–107.

8. Соснин, Н. А. Плазменные технологии: руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. — Томск : Изд-во ТПУ, 2013. — 406 с.

9. Опыт внедрения роботов в сварочное производство / М. А. Шолохов [и др.] // Сварка и диагностика. — 2014. — № 4. — С. 41–43.

10. Особенности управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С. И. Полосков [и др.] // Сварочное производство. — 2002. — № 7. — С. 6–13.

11. Шипилов, А. В. Определение оптимальных условий плавления присадочной проволоки при автоматической орбитальной сварке стальных трубопроводов / А. В. Шипилов, В. А. Ерофеев, С. И. Полосков // Сварочное производство. — 2012. — № 3. — С. 12–19.

12. Страхова, Е. А. Физико-математическое моделирование процесса наплавки с поперечными колебаниями плазмотрона / Е. А. Страхова, В. А. Ерофеев, В. А. Судник // Сварка и диагностика. — 2009. — № 3. — С. 32–38.

13. Полосков, С. С. Особенности и пути совершенствования инновационной деятельности высокотехнологичных наукоемких предприятий / С. С. Полосков // Modern Economy Success. — 2019. — № 2. — С. 87–94.

14. Ерофеев, В. А. Особенности технологии дуговой наплавки упрочняющих слоев на стальную подложку / В. А. Ерофеев, С. К. Захаров, О. В. Кузнецов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2014. — № 11–1. — С. 132–138.

15. Ерофеев, В. А. Компьютерный инженерный анализ процесса плазменно-дуговой наплавки слоя цветного сплава на стальные тела вращения / В. А. Ерофеев, Е. А. Страхова // Заготовительные производства в машиностроении. — 2011. — № 12. — С. 12–18.

16. Зайффарт, П. Расчетные модели для оценки вязкости разрушения низко- и среднелегированного металла шва в зависимости от его состава и структуры / П. Зайффарт, О. Г. Касаткин // Сварочное производство. — 1995. — № 6. — С. 10–12.

17. Касаткин, О. Г. Интерполяционные модели для оценки фазового состава зоны термического влияния при дуговой сварке низколегированных сталей / О. Г. Касаткин, П. Зайффарт // Автоматическая сварка. — 1984. — № 1. — С. 7–11.

Сдана в редакцию 04.10.2019
Принята к публикации 05.12.2019

Об авторе:

***Полосков Станислав Сергеевич*,**
аспирант Московского областного государственного университета (РФ, 105005, г. Москва, ул. Радио, 10 А),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8205-3565
stanislavpoloskov@gmail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.313 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-357-365

Бездатчиковое управление высокооборотным вентильно-индукторным генератором микроэнергетической установки*

П. Г. Колпахчьян[1], Д. В. Ольховатов[2]**
[1] Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Sensorless control of the high-speed switched reluctance generator of the micro power plant ***

P. G. Kolpakhchyan, D. V. Olkhovatov**
[1] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В распределенных и автономных системах генерации, использующих возобновляемые источники энергии, действуют генерирующие установки малой мощности (не более 100–200 кВт) на базе микротурбин. Наиболее эффективно микротурбины функционируют на высоких частотах вращения. В связи с этим генератор, работающий с микротурбиной, тоже должен быть высокооборотным. Генератор — это вентильно-индукторная электрическая машина (ЭМ), которой необходима информация о положении ротора. В таких механизмах при высоких оборотах затруднительно применение датчика положения. В данной статье рассматриваются вопросы бездатчикового управления высокооборотным вентильно-индукторным электрогенератором совместно с паровой микротурбиной.
Материалы и методы. Итак, необходимо оценить правильность разработанного принципа управления высокооборотной вентильно-индукторной ЭМ. С этой целью создана математическая модель, включающая модели исследуемой ЭМ, преобразователя электроэнергии и системы управления. Для рассматриваемой ЭМ определены активное сопротивление, а также зависимости потокосцепления фазы от протекающего через нее тока и положения подвижного элемента. Используемый метод предполагает зондирование неработающей фазы электрической машины короткими импульсами напряжения равной длительности и измерение тока в этой фазе. Если длительность импульса напряжения намного меньше постоянной времени фазы, то амплитуда импульса тока обратно пропорциональна индуктивности. Таким образом, регистрируя максимум амплитуды токового импульса, можно определить прохождение ротором несогласованного положения для зондируемой фазы. Эта информация используется для формирования управляющих воздействий другими фазами. При этом длительность тестовых импульсов

Introduction. In the distributed and autonomous generation systems using renewable energy sources, low-power generating units (not more than 100-200 kW) based on microturbines function. Microturbines operate most efficiently at high rotational speeds. In this regard, the generator running with a microturbine must also be a high-speed one. A generator is a switched reluctance electric machine (EM) that needs information on the rotor position. It is difficult to use a position sensor in such mechanisms at high speeds. This paper discusses the issues of sensorless control of a high-speed switched reluctance electric generator in conjunction with a steam microturbine.
Materials and Methods. So, it is required to evaluate the proof-of-principle developed to control a high-speed switched reluctance EM. For this purpose, a mathematical model has been created including models of the investigated EM, an electric power converter, and a control system. For the EM under consideration, the active resistance is determined, as well as the dependence of the phase flux linkage on the current flowing through it and the position of the moving element. The method used involves probing the idle phase of an electric machine with short voltage pulses of equal duration, and measuring the current in this phase. If the voltage pulse length is much shorter than the phase time constant, then the current pulse amplitude is inversely proportional to the inductance. Thus, registering the maximum current pulse amplitude, it is possible to determine the rotor passage through an uncoordinated position for the probed phase. This information is used to form control actions by other phases. Moreover, the length of the test voltage pulses, required to obtain current pulses



* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по Соглашению № 14.577.21.0260 от 27.09.2017 г. ID RFMEFI57717X0260.
** E-mail: Kolpahchyan@mail.ru, Olkhovatov@gmail.com
*** The research is done with the support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement no. 4.577.21.0260 of 27.09.2017 ID RFMEFI57717X0260).

напряжения, необходимая для получения импульсов тока достаточной для измерений величины, является значительной по сравнению с длительностью времени подачи этих импульсов. Поэтому с ростом частоты вращения за интервал измерений подается количество тестовых импульсов, недостаточное для измерения положения с необходимой для целей управления точностью. Это существенно снижает точность определения положения ротора, поэтому на высоких скоростях вращения ограничено применение такого метода без дополнительного уточнения положения ротора. Для повышения точности измерений в этом случае следует оценить скорость нарастания тока при подаче основного импульса напряжения или частоту следования импульсов напряжения, формирующих ток фазы до перехода в одноимпульсный режим управления.
Результаты исследования. Доказаны два вывода, важные для коррекции оценки положения ротора в одноимпульсном режиме работы реактивно-индукторной ЭМ. Первый — об эффективности предложенного метода фильтрации результатов измерения токов фаз, второй — о возможности использования выявленных информационных признаков. Приведены результаты анализа процессов в вентильно-индукторной ЭМ при использовании бездатчикового управления, реализующего описанные принципы определения положения ротора.
Обсуждение и заключение. Для коррекции оценки положения ротора могут быть использованы следующие информационные признаки: наличие паузы между импульсом возбуждения и началом процесса генерации; снижение тока к моменту начала генерации. Для уточнения оценки может использоваться следующий факт: на интервале генерации перегиб кривой тока, соответствующий максимуму индуктивности фазы, наблюдается при одном и том же положении ротора.

Ключевые слова: микротурбина, электрогенератор, вентильно-индукторная машина, бездатчиковое управление.

Образец для цитирования: Колпахчьян, П. Г. Бездатчиковое управление высокооборотным вентильно-индукторным генератором микроэнергетической установки / П. Г. Колпахчьян, Д. В. Ольховатов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 357−365.https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-357-365

sufficient for measuring the value, is of significance versus the duration of the pulsing time. Hence, with an increase in the rotational speed, the number of test pulses is insufficient for measuring the position with the accuracy required for the control goals. This reduces drastically the precision of determining the rotor position; therefore, at high speeds, the application of this method is limited without further refinement of the rotor position. In this case, to increase the precision of measurements, it is necessary to evaluate the rate of current rise when applying the basic voltage pulse or the voltage pulse rate forming the phase current before switching to a single-pulse control mode.
Research Results. Two conclusions important for correcting the estimation of the rotor position in a single-pulse operation mode of a reluctance EM are proved. The first conclusion is on the efficiency of the proposed technique of filtering phase current measurement data, the second one concerns the applicability of the identified information criteria. The analysis results of the processes in the switched reluctance EM using sensorless control that implements the described principles for determining the rotor position are presented.
Discussion and Conclusions. To correct the estimation of the rotor position, the following information criteria can be used: the presence of a pause between the excitation pulse and the start of the generation process; the decrease in current by the time the generation begins. To refine the estimate, the following fact can be used: on the generation interval, the current curve knee corresponding to the maximum phase inductance is observed at the same rotor position.

Keywords: microturbine, electric generator, switched-reluctance machine, sensorless control.

For citation: P.G. Kolpakhchyan, D.V. Olkhovatov. Sensorless control of the high-speed switched reluctance generator of the micro power plant. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 357−365. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-357-365

Введение. Одно из направлений развития энергетики связано с применением распределенных и автономных систем генерации, использующих возобновляемые источники энергии. В таких системах действуют генерирующие установки малой мощности (не более 100–200 кВт). Их особенность — комбинированное использование различных видов энергии: солнечное излучение, ветер, геотермальные источники, утилизация отходов и т. п. Наиболее сложной с точки зрения использования в системах распределенной или автономной генерации является тепловая энергия, так как ее необходимо преобразовать в электрическую. В рассматриваемых энергетических системах для этого рационально применять паровые микротурбины. Они работают на влажном или перегретом паре, который электрогенератор преобразует в электрическую энергию. Решая задачу компактности и эффективности турбины, следует обеспечить высокую частоту ее вращения. Соответственно, генератор также должен быть рассчитан на работу с высокой частотой вращения.

Использование высокооборотной (*high-speed*) турбины накладывает ограничения на конструкцию сопряженного с ней электрогенератора. Из-за высокой скорости вращения его целесообразно выполнять на общем валу с паровой турбиной, так как наличие муфт для сопряжения турбины и генератора существенно усложняет конструкцию и последующее обслуживание. В системах автономной и распределенной энергетики в качестве

электрогенераторов на мощностях до 200 кВт широко применяются синхронные электрические машины (ЭМ) с постоянными магнитами на роторе. Они обладают наилучшими удельными характеристиками. Однако с учетом высоких скоростей вращения конструирование таких электрических машин осложняется проблемами крепления постоянных магнитов и балансировкой ротора. Кроме того, если электрогенератор работает в непосредственной близости от турбины, он оказывается в зоне высоких температур, недопустимых для постоянных магнитов. Поэтому в качестве электрогенератора, предназначенного для работы совместно с паровой микротурбиной, целесообразно использовать вентильно-индукторную ЭМ, у которой отсутствуют обмотка и постоянные магниты на роторе.

Для управления вентильно-индукторной ЭМ необходима информация о положении ротора. В большинстве случаев для этого используется датчик положения ротора. При работе на высоких скоростях вращения нежелательно располагать электрогенератор в непосредственной близости от паровой турбины, т. к. это значительно усложняет конструкцию. Известны различные способы определения положения ротора вентильно-индукторной ЭМ без датчика положения [1–4]. Однако их использование для высокооборотного генератора требует учета ряда особенностей. Представленная статья посвящена вопросам применения бездатчикового управления высокооборотным вентильно-индукторным генератором, предназначенным для работы совместно с паровой микротурбиной.

Материалы и методы

Обзор существующих решений и постановка задачи. Как правило, в вентильно-индукторных ЭМ применяются датчики положения ротора дискретного типа. Такое решение увеличивает габариты электрической машины и усложняет технологию сборки и настройки.

В настоящее время для вращающихся вентильно-индукторных ЭМ разработаны принципы бездатчикового управления. Они отличаются использованием различных информационных признаков определения положения ротора [2–4]. В большинстве случаев такие решения не могут быть непосредственно использованы для высокооборотных генераторов.

Практически все способы определения положения ротора вентильно-индукторной ЭМ без использования физических датчиков основаны на однозначной зависимости индуктивности фазы от положения ротора (рис. 1).

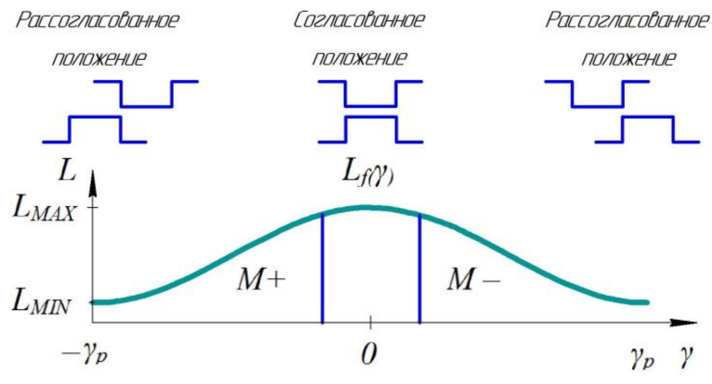


Рис. 1. Зависимость индуктивности фазы вентильно-индукторной электрической машины от положения ротора

В согласованном положении (зубец ротора находится под зубцом статора) индуктивность максимальна, в несогласованном положении (зубец ротора находится между зубцами статора) — минимальна. Насыщение магнитной системы влияет на разницу между максимальным и минимальным значениями индуктивности, но не меняет характера зависимости. Поэтому положение подвижного элемента можно определить, используя косвенное измерение индуктивности фазы вентильно-индукторной ЭМ.

Варианты реализации этого способа отличаются методом оценки индуктивности одной или нескольких фаз в процессе работы венитильно-индукторной ЭМ [3, 4]. Используемый метод предполагает зондирование неработающей фазы электрической машины короткими импульсами напряжения равной длительности и измерение тока в этой фазе. Если длительность импульса напряжения намного меньше постоянной времени фазы, то амплитуда импульса тока обратно пропорциональна индуктивности. Таким образом, регистрируя максимум амплитуды токового импульса, можно определить прохождение ротором несогласованного положения для зондируемой фазы. Эта информация используется для формирования управляющих воздействий другими фазами. Тестовые импульсы подаются серией в течение времени, соответствующего прохождению ротором несогласо-

ванного положения. Точность определения положения ротора зависит от частоты следования тестовых импульсов.

Разновидностью способа определения положения ротора вентильно-индукторной электрической машины по изменению индуктивности фазы является использование в качестве тестового основного импульса напряжения (рис. 1). Реализация такого способа возможна как в двигательном, так и в генераторном режиме.

Следует отметить ограниченность применения метода, основанного на зондировании неработающей фазы тестовыми импульсами для высокооборотной вентильно-индукторной ЭМ. Длительность тестовых импульсов напряжения, необходимая для получения импульсов тока достаточной для измерений величины, является значительной по сравнению с длительностью времени подачи этих импульсов. Поэтому с ростом частоты вращения за интервал измерений подается количество тестовых импульсов, недостаточное для измерения положения с необходимой для целей управления точностью. Это существенно снижает точность определения положения ротора, поэтому на высоких скоростях вращения ограничено применение такого метода без дополнительного уточнения положения ротора. Для повышения точности измерений в этом случае следует оценить скорость нарастания тока при подаче основного импульса напряжения или частоту следования импульсов напряжения, формирующих ток фазы до перехода в одноимпульсный режим управления.

Формулирование проблемы бездатчикового управления высокооборотного вентильно-индукторного электрогенератора. Особенностью конструкции вентильно-индукторной ЭМ является однозначная зависимость индуктивности фазы от положения ротора относительно статора. Этот эффект может быть использован для косвенного определения положения ротора. Как было отмечено выше, такой способ определения положения ротора является наиболее распространенным. При этом необходимо учитывать, что насыщение магнитной системы существенно влияет на индуктивность. Стремление уменьшить размеры ротора для снижения момента инерции и улучшения прочностных показателей привело к тому, что рассматриваемый электрогенератор является сильно насыщенной электрической машиной. При максимальном токе статора индуктивность в согласованном положении снижается более чем в три раза по сравнению с индуктивностью в ненасыщенном состоянии. На рис. 2 показаны зависимости индуктивности фазы от угла поворота ротора при разных токах.

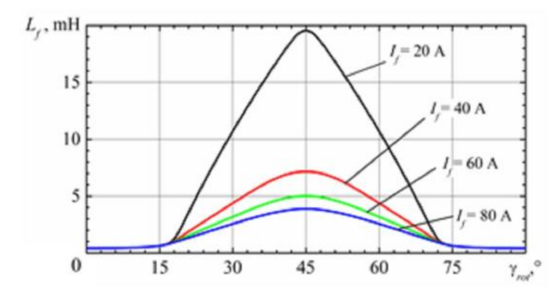


Рис. 2. Зависимости индуктивности фазы статора от угла поворота ротора при разных токах

Частота следования тестовых импульсов, используемых для оценки индуктивности фазы, определяется типом применяемого аналого-цифрового преобразователя. При использовании встроенных преобразователей управляющих микропроцессорных устройств время преобразования составляет порядка 2–3 мс. Если использовать такое же соотношение зубцов статора и ротора при частоте вращения ротора 12 000 об/мин (200 Гц), то частота следования импульсов тока фазы должна быть в четыре раза больше — 800 Гц. Как указано выше, тестовые импульсы подаются при отсутствии тока в фазе, если индуктивность меняется от положения ротора. Этот интервал в режиме генерации соответствует нарастанию индуктивности и составляет порядка одной четверти периода следования токовых импульсов [3]. Из приведенных на рис. 2 зависимостей видно, что изменение индуктивности, необходимое для измерений, происходит при угле поворота ротора в диапазоне от 20° до 45°.

Для рассматриваемого случая интервал времени подачи тестовых импульсов составляет около 300 мкс. За это время аналого-цифровой преобразователь может выполнить 100–120 отсчетов. Коэффициент заполнения тестовых импульсов не может превышать 0,5, т. к. иначе после снятия напряжения ток не будет успевать снижаться до нуля. На практике же коэффициент заполнения тестовых импульсов не превышает 0,25–0,3, чтобы не допускать слишком большого нарастания тока при минимальной индуктивности фазы и снизить влияние на процесс измерений электродвижущей силы (ЭДС), возникающей в фазе при вращении ротора.

Необходимо учитывать погрешности преобразования и необходимость достоверной фиксации максимума амплитуды токового импульса. В этой связи минимальное количество измерений на один тестовый импульс напряжения — 10–15. Тогда на интервале подачи тестовых импульсов их количество не будет превышать

6–8, что дает разрешающую способность определения положения ротора на уровне 4–6°. Такая точность определения положения ротора недостаточна для целей управления.

Индуктивность фазы рассматриваемой ЭМ в начале интервала измерений составляет порядка 5 мГн в ненасыщенном состоянии (при токе до 20 А, см. рис. 2). При напряжении в звене постоянного тока 600 В интенсивность нарастания тока будет 120 000 А/с. Оценку положения ротора целесообразно выполнять при токе 5–10 А, до достижения насыщения, так как в этом случае зависимость индуктивности от положения ротора линейна. Тогда на номинальной скорости вращения будет проводиться порядка 20–30 отсчетов, что дает разрешающую способность на уровне 0,5–1°. Таким образом, применение основного токового импульса на высоких скоростях вращения обеспечивает на порядок более высокую точность оценки положения ротора (в сравнении с использованием тестовых импульсов).

В процессе пуска и разгона генератора применение тестовых импульсов, подаваемых в неработающую фазу, дает более точную оценку положения ротора, поэтому в системе управления необходимо совместное использование обоих методов.

Математическая модель вентильно-индукторной электрической машины. Для оценки правильности разработанного принципа управления высокооборотной вентильно-индукторной ЭМ была разработана математическая модель (ММ), включающая модели исследуемой ЭМ, преобразователя электроэнергии и системы управления. При составлении модели были приняты допущения, учитывающие особенности решаемой задачи [5–8]. Основное из них: фазы рассматриваемой ЭМ имеют не связанные между собой в магнитном отношении магнитопроводы, поэтому процессы в них рассматриваются независимо.

При принятых допущениях электромагнитные процессы в фазе ЭМ рассматриваемого типа описываются уравнением [1–4]:

$$\frac{d\Psi_{f1,2,3}}{dt} = U_{f1,2,3} - I_{f1,2,3}\left(\Psi_{f1,2,3}, \gamma_{rot}\right) R_{f1,2,3}, \qquad (1)$$

где $\Psi_{f1,2,3}$, $U_{f1,2,3}$ и $R_{f1,2,3}$ — потокосцепление, напряжение и активное сопротивление фаз; $I_{f\ 1,2,3}\left(\Psi_{f\ 1,2,3}, \gamma_{rot}\right)$ — ток фазы, определяемый в зависимости от величины потокосцепления фазы и положения ротора.

Для рассматриваемой ЭМ были определены активное сопротивление и зависимости потокосцепления фазы от протекающего через нее тока и положения подвижного элемента.

Процессы в звене постоянного тока при принятых допущениях описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dI_0}{dt} &= \frac{1}{L_0}\left(E_0 - R_0 I_0 - U_c\right); \\ \frac{dU_c}{dt} &= \frac{1}{C}\left(I_0 - \left(I_{d1} + I_{d2}\right)\right), \end{aligned} \qquad (2)$$

где E_0, L_0, R_0 — ЭДС, индуктивность и активное сопротивление звена постоянного тока; C, U_C — емкость в звене постоянного тока на входе преобразователя и напряжение на ней.

Напряжение на фазах формируется таким образом, чтобы обеспечить создание токового импульса заданной величины и длительности. В соответствии с принятыми допущениями, величина напряжения, приложенного к фазе, определяется в соответствии со следующими условиями:

$$U_f = \begin{cases} U_c, \text{ если } I_f \in \left[0, I_m - \frac{\Delta I}{2}\right[\vee I_{fз} \in \left[I_m - \frac{\Delta I}{2}, I_m + \frac{\Delta I}{2}\right] \wedge \frac{dI_f}{dt} > 0; \\ 0, \text{ если } I_f \in \left[I_m - \frac{\Delta I}{2}, I_m + \frac{\Delta I}{2}\right] \wedge \frac{dI_f}{dt} < 0; \\ -U_c, \text{ если } I_f = 0 \wedge I_f > 0. \end{cases} \qquad (3)$$

Здесь I_m — амплитуда формируемого токового импульса фазы; ΔI — ширина токового коридора.

Длительность и фаза токового импульса прямоугольной формы с заданной амплитудой определяется начальным и конечным углами $\alpha 0$ и $\alpha 1$, отсчитываемыми от согласованного положения фазы.

Токи, потребляемые фазами от звена постоянного тока, при используемом принципе переключения силовых полупроводниковых приборов определяются в соответствии с выражением:

$$I_{d1,2,3} = \text{sign}(U_{f1,2,3}) I_{f1,2,3}, \qquad (4)$$

где $\operatorname{sign}(U_{f1,2,3})$ — функция выделения знака напряжения фазы.

Уравнения (1) и (2) с учетом выражений (3) и (4) представляют собой ММ, описывающие процессы в рассматриваемой вентильно-индукторной ЭМ. Ее задействовали для моделирования процессов в ЭМ при использовании бездатчикового алгоритма управления. В расчетах кроме указанных параметров и характеристик ЭМ применены следующие значения: активное сопротивление и индуктивность в звене постоянного тока приняты равными R_0 = 0,1 Ом; L_0 = 0,001 Гн; емкость конденсатора звена постоянного тока C = 5000 мкФ; ЭДС звена постоянного тока E_0 = 595 В.

Результаты исследования. Для исследования рассмотренных вариантов бездатчикового определения положения ротора высокоскоростного вентильно-индукторного генератора наибольший интерес представляет режим работы с номинальной скоростью. В этом режиме ЭМ управляется в одноимпульсном режиме. Моменты включения и выключения силовых ключей определяются в зависимости от положения ротора. Условие максимально эффективной отдачи энергии работающей фазой — наличие тока заданной величины в фазе к моменту, когда ротор находится в положении, соответствующем началу интервала генерации этой фазы (см. рис. 1). Для этого с некоторым опережением к фазе прикладывается импульс положительного напряжения: замыкаются оба силовых ключа (например, для фазы A, $S1$ и $S2$). После того как ротор займет положение, соответствующее началу процесса генерации, силовые ключи выключаются, и начинается процесс генерации. Для ограничения неконтролируемого роста тока при достижении им заданного значения один из ключей размыкается — и образуется контур короткого замыкания фазы через замкнутый силовой ключ и диод.

На рис. 3 представлены результаты моделирования электромагнитных процессов в реактивно-индукторном генераторе при номинальной частоте вращения.

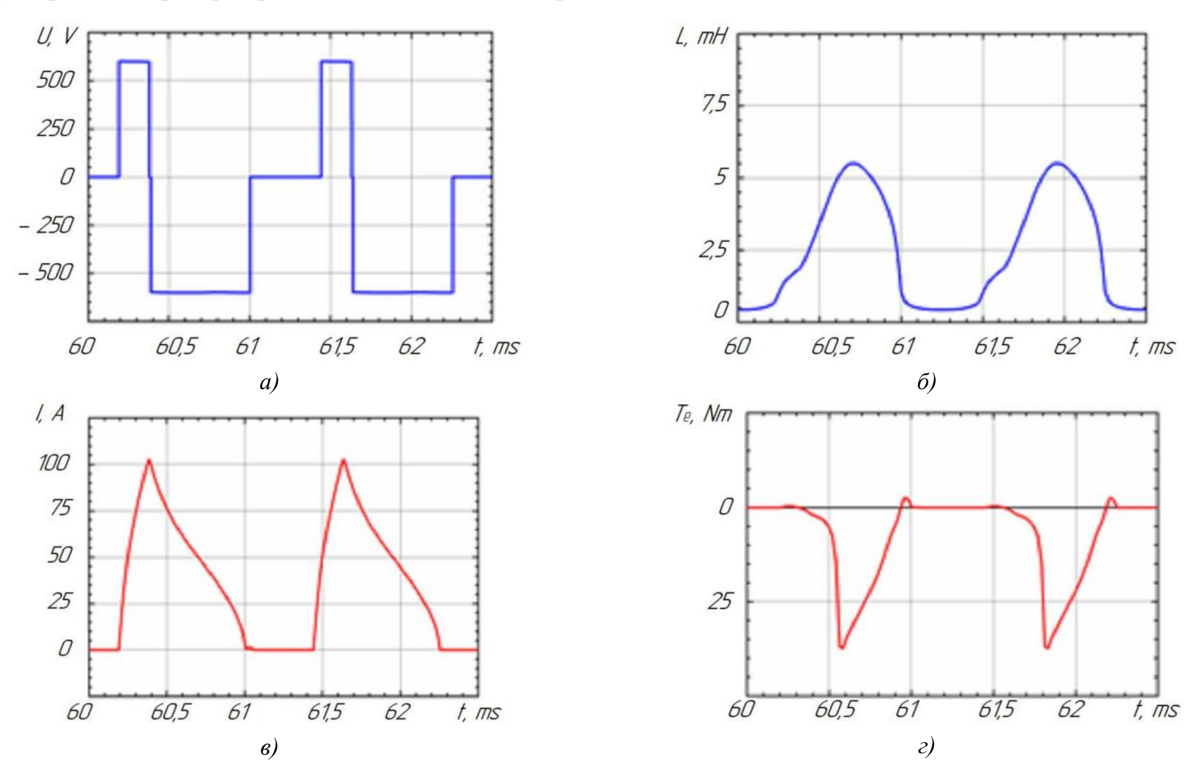


Рис. 3. Результаты математического моделирования процессов в реактивно-индукторном генераторе при номинальной частоте вращения: напряжение (*а*); индуктивность (*б*); ток (*в*); электромагнитный момент (*г*)

Параметры импульса возбуждения рассчитаны таким образом, чтобы к началу процесса генерации ток фазы достигал заданного значения 100 А. В этом случае отсутствует пауза между импульсом возбуждения и началом генерации, во время которой фаза находится в состоянии короткого замыкания. На рис. 3 приведены зависимости напряжения, тока и индуктивности фазы, а также развиваемого ею электромагнитного момента.

Как следует из приведенного выше описания принципа управления, в одноимпульсном режиме процесс генерации является неуправляемым, а ЭМ регулируется за счет изменения параметров импульса возбуждения. Моменты его начала и окончания зависят от положения ротора. Поэтому точность определения положения имеет важное значение для эффективной работы ЭМ [9, 10]. Если импульс возбуждения подается с опережением, он смещается в сторону уменьшения индуктивности фазы, ее ток нарастает с большей интенсивностью, и фаза переводится в режим короткого замыкания. Величина паузы между окончанием импульса возбуждения и

началом процесса генерации зависит от расхождения между расчетным и реальным положением ротора и может использоваться для коррекции оценки положения ротора.

Если импульс возбуждения подается с запаздыванием относительно расчетного момента времени, он смещается в сторону большей индуктивности, и его длительности не хватает для нарастания тока до заданного значения. Поэтому снижение величины тока в момент окончания импульса возбуждения — признак того, что оценка положения ротора выполнена с отставанием от реального значения. На рис. 4 показаны зависимости тока фазы для случаев совпадения, опережения и отставания оценки положения ротора от его действительного значения.

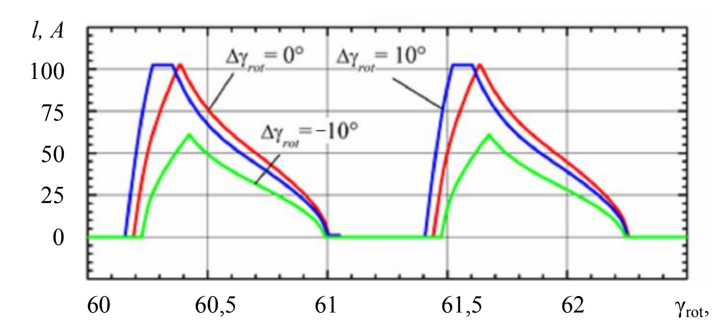


Рис. 4. Зависимости тока фазы реактивно-индукторной ЭМ для случаев совпадения, опережения и отставания оценки положения ротора

Приведенные на рис. 4 зависимости подтверждают возможность использования выявленных информационных признаков для оценки ошибки определения положения ротора.

Сравнение полученных кривых позволяет выявить следующую особенность. Кривая тока фазы в режиме генерации имеет точку перегиба, соответствующую максимуму индуктивности фазы. В случае неизменного тока фазы (рис. 2) он соответствует согласованному положению зубцов статора и ротора. При снижении тока в процессе движения ротора насыщение магнитной системы снижается, и положение максимума индуктивности фазы смещается в сторону больших углов. У этого эффекта есть особенность: положение точки перегиба кривой тока не зависит от времени подачи импульса возбуждения, а будет определяться только значением тока в начале процесса генерации. Эта особенность также может быть использована для уточнения положения ротора вентильно-индукторной ЭМ при работе в одноимпульсном режиме.

Применение описанных информационных признаков требует контроля тока, его первой и второй производной. При использовании распространенных типов аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) ошибочность измерений будут достигать 5–10 %. Поэтому для фильтрации сигнала тока в системе управления высокооборотным реактивно-индукторным генератором предлагается фильтр Калмана третьего порядка, использующий модель тока фазы, построенную на базе уравнения:

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f\left(\gamma_{rot}, I_f\right)} \left(U_f - R_f I_f - I_f \omega_{rot} \left. \frac{\partial L_f\left(\gamma_{rot}, I_f\right)}{\partial \gamma_{rot}} \right|_{I_f = \mathrm{const}} \right). \quad (5)$$

На рис. 5 приведены результаты анализа процессов в вентильно-индукторной ЭМ при использовании бездатчикового управления, реализующего описанные выше принципы определения положения ротора.



Рис. 5. Процесс коррекции оценки положения ротора в одноимпульсном режиме работы реактивно-индукторной ЭМ

Расчеты проводились при следующих условиях. ЭМ вращается с номинальной скоростью. Импульс возбуждения имеет те же параметры, что и для рассмотренного ранее случая. Токи фаз статора измеряются АЦП со временем преобразования 5 мкс и имеют погрешность 10 %, распределенную по нормальному закону. В начальный момент оценка положения ротора на 10 градусов отличается от реального. Представлен процесс коррекции оценки положения ротора. Анализ полученных результатов показал эффективность предложенного метода фильтрации результатов измерения токов фаз и возможность использования выявленных информационных признаков для коррекции оценки положения ротора в одноимпульсном режиме работы реактивно-индукторной ЭМ.

Обсуждение и заключения. Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов. Реактивно-индукторный генератор, предназначенный для работы совместно с паровой микротурбиной, управляется без датчика положения ротора, с использованием соответствующего алгоритма. Существует однозначная зависимость между положением ротора и индуктивностью фазы статора, поэтому все методы бездатчикового определения положения ротора базируются на косвенном измерении индуктивности фазы. На высоких скоростях вращения без датчика положения ротора нерационально применять подходы, основанные на подаче в неработающую фазу серии тестовых импульсов, так как разрешающая способность такого способа недостаточна для эффективного контроля генератора. В этом случае рациональным является контроль параметров основного импульса тока.

Реактивно-индукторная ЭМ в режиме генерации управляется путем изменения времени подачи и длительности импульса напряжения (импульса возбуждения), который к началу процесса генерации создает ток в фазе ЭМ. Момент подачи и длительность импульса возбуждения определяются положением ротора, поэтому эффективное управление процессом генерации возможно только при точной оценке положения ротора. Для коррекции оценки положения ротора могут быть использованы такие информационные признаки, как:
— наличие паузы между импульсом возбуждения и началом процесса генерации (оценка опережает действительное положение ротора);
— снижение тока к моменту начала генерации (оценка отстает от действительного положение ротора).

Для уточнения оценки также может использоваться следующий факт: на интервале генерации перегиб кривой тока, соответствующий максимуму индуктивности фазы, наблюдается при одном и том же положении ротора. Применение указанных информационных признаков позволяет создать эффективный алгоритм определения положения ротора высокооборотного реактивно-индукторного генератора без физического датчика.

Библиографический список

1. Do, V. L. Modeling, simulation and control of reluctance motor drives for high speed operation [Электронный ресурс] / V. L. Do, Ta Cao Minh // 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition : proc. — Режим доступа : https://ieeexplore.ieee.org/document/5316067 (дата обращения : 12.11.2019).

2. Cai, J. A Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motors Based on Phase Inductance Slope / J. Cai, Z. Deng // A Journal of Power Electronics. — 2013. — Vol. 13, № 2. — P. 264–274.

3. Xin, K. A new simple sensorless control method for switched reluctance motor drives / K. Xin, Z. Qionghua, J. Luo // Electrical Machines and Systems : Eighth International Conference, 27–29 September 2005 in Nanjing / IEEE. — 2005. — Vol. 1. — P. 594–598.

4. Kolpakhchyan, P. Emergency Generator Design for the Maritime Transport Based on the Free- Piston Combustion Engine / P. Kolpakhchyan, A. Kochin, A. Shaikhiev // Our See. — 2015. — Vol. 62, is. 2. — P. 78–84.

5. Ефромеев, А. Г. Методика выбора вентильно-индукторного двигателя для построения физической модели привода / А. Г. Ефромеев, Д. И. Степаничев // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2011. — № 2. — С. 140–143.

6. Александровский, С. В. Разработка математической и имитационной модели вентильно-индукторного двигателя / С. В. Александровский, Ю. Н. Петренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2011. — № 2. — С. 15–22.

7. Сарач, Е. Б. Особенности моделирования электрической трансмиссии транспортного средства на примере линейного тягового электрического привода / Е. Б. Сарач, А. А. Стадухин // Наука и образование. — 2011. — № 10. — С. 61.

8. Математическая модель вентильно-индукторной реактивной электрической машины / В. А. Дмитриевский [и др.] // Наука и образование. — 2011. — № 10. — С. 60.

9. Hamzehbahmani, H. Modeling and simulating of single side short stator linear induction motor with the end effect / H. Hamzehbahmani // Journal of electrical engineering. — 2011. — Vol. 62, № 5. — P. 302–308.

10. Sensorless control of the linear switched-reluctance motor of emergency power generator / P. Kolpakhchyan [et al.] // Journal of Electrical Engineering and Technology. — 2018. — № 13 (5). — P. 1956–1964.

Сдана в редакцию 06.09.2019
Принята к публикации 02.12.2019

Об авторах:

Колпахчьян Павел Григорьевич,
заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2), доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1669-2075
kolpahchyan@mail.ru

Ольховатов Дмитрий Викторович,
инженер НИИ Математического моделирования и прогнозирования сложных систем Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID:http://orcid.org/0000-0003-3723-5375
olkhovatov@gmail.com

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 366–373. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 366–373. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.178.162.42; 620.178.15 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-366-373

Исследование поверхности трибоконтакта после трения в водном растворе капроновой кислоты*

Е. Г. Дроган[1], В. Э. Бурлакова[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Tribocontact surface exploration after friction in hexanoic acid solution***

E. G. Drogan[1], V. E. Burlakova[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Работа посвящена исследованию эволюции коэффициента трения пары сплав медь-сталь при трении в водном растворе капроновой кислоты различной концентрации, а также изучению противоизносных свойств пары трения сталь-сталь при трении в маслянокислотной среде. Целью данного исследования являлось изучение влияния добавок капроновой кислоты на трибологические характеристики пар трения при фрикционном взаимодействии в составах на водной основе и на основе вазелинового масла.
Материалы и методы. Проведены трибологические исследования пары трения латунь-сталь на машине трения торцевого типа АЕ-5. Исследование противоизносных характеристик проводилось на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) в соответствие со стандартом ГОСТ 9490–75. При испытаниях на ЧШМ объективными параметрами смазывающих свойств смазочных композиций являлись: нагрузка сваривания (Рс); диаметр пятна износа (Dн), критическая нагрузка (Рк). Параметры шероховатости сервовитной пленки определялись с помощью оптической профилометрии; ее микрогеометрия и структура на наноуровне — с помощью атомно-силовой микроскопии.
Результаты исследования. Изучены трибологические свойства трибосопряжения латунь-сталь в водных средах и сталь-сталь в средах на основе вазелинового масла. Установлена зависимость фрикционных характеристик пары трения латунь-сталь от концентрации карбоновой кислоты. Обнаружена ее оптимальная концентрация, обеспечивающая реализацию эффекта безызносности. Выявлено уменьшение шероховатости поверхности в результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты по сравнению с исходной поверхностью трения вследствие формирования достаточно плотного слоя, образованного мелкозернистыми кластерами меди с малым разбросом частиц по размеру. Обнаружена зависимость триботехнических характеристик пары трения сталь-сталь

Introduction. The paper considers the evolution of friction coefficient of the pair of copper - steel alloy under friction in a hexanoic acid solution in various concentrations, and antiwear properties of the steel-steel friction pair in an oil-acidic medium. The work objective is to explore the effect of hexanoic acid additives on the tribological characteristics of friction pairs under the friction interaction in waterborne and paraffin-based formulations.
Materials and Methods. Tribological studies of a brass-steel friction pair were carried out on the AE-5 end-type friction machine. Antiwear characteristics were explored on a four-ball friction machine (FBW) in accordance with the standard GOST 9490–75. When tested at the FBW, the objective parameters of the lubricity of the oiling compositions were: welding load (Pc); wear spot diameter (Dн), critical load (Pк). Roughness parameters of the servovite film were determined through the optical profilometry; its microgeometry and structure at the nanoscale – through the atomic force microscopy.
Research Results. Tribological properties of the brass-steel tribocoupling in aqueous media and steel-steel one in petroleum paraffin-based media are studied. The dependence of the frictional characteristics of the brass-steel friction pair on the concentration of carboxylic acid is established. Its optimum concentration is specified, which provides the effect of wearlessness. A decrease in surface roughness is revealed as a result of the frictional interaction of a brass-steel friction pair in the hexanoic acid solution compared to the initial friction surface due to the formation of a sufficiently dense layer from fine-grained copper clusters with tight particle-size dispersion. The tribological characteristics of a steel-steel friction pair were found to depend on the composition of the



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: ekaterina.drogan@gmail.com, vburlakova@donstu.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

от состава смазочной среды. Показано, что зависимость размера диаметра пятна износа от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. %. Критическая нагрузка ($Р_к$) при содержании 0,05 и 0,1 масс. % увеличивается на 32%, нагрузка сваривания ($Р_с$) — на 27 %.
Обсуждение и заключения. В результате трибологических исследований пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено, что оптимальной молярной концентрацией кислоты в составе смазки является 0,1 моль/л. При фрикционном взаимодействии пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты на поверхностях трения формируется антифрикционная медная пленка, способствующая резкому снижению коэффициента трения до 0,007 и износа металлов пары трения до 25 раз. В результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено уменьшение шероховатости по сравнению с исходной поверхностью трения. Обнаружено, что фрикционное взаимодействие пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты приводит к значительной модификации поверхности трения в результате осаждения мелкодисперсных кластеров меди, образующихся в составе смазочной среды и формирующих сервовитную пленку. В результате исследований установлено, что зависимость размера диаметра пятна износа от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. %. Показано, что добавление 0,1 масс. % капроновой кислоты в состав смазочной композиции обнаруживает наименьший износ трибопары сталь-сталь, диаметр пятна износа при этом снижается до 0,497 мм, критическая нагрузка ($Р_к$) и нагрузка сваривания ($Р_с$) увеличиваются на 32% и 27 % соответственно.

Ключевые слова: коэффициент трения, избирательный перенос, сервовитная пленка, пятно износа, нагрузка сваривания, критическая нагрузка.

Образец для цитирования: Дроган, Е. Г. Исследование поверхности трибоконтакта после трения в водном растворе капроновой кислоты / Е. Г. Дроган, В. Э. Бурлакова // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №4. — С. 366−373. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-366-373

lubricant. It is shown that the dependence of the size of the wear scar diameter (WSD) on the acid content in the base oil is nonmonotonic in nature with a pronounced minimum at a concentration of 0.1 mass. %. The critical load (Рк) at a content of 0.05 and 0.1 mass. % increases by 32%, welding load (Рс) - by 27%.
Discussion and Conclusions. As a result of the tribological studies of a brass-steel friction pair in the hexanoic acid solution, it has been found that the optimum acid molar concentration in the lubricant composition is 0.1 mol/L. Under the frictional interaction of a brass-steel pair in the hexanoic acid solution, an antifriction copper film is formed on the friction surfaces, which contributes to a sharp decrease in the friction coefficient to 0.007 and metal wear of the friction pair to 25 times. As a result of the frictional interaction of a brass-steel friction pair in the hexanoic acid solution, a decrease in roughness is revealed compared to the initial friction surface. It is found that the frictional interaction of a brass-steel pair in the hexanoic acid solution causes a significant modification of the friction surface as a result of the deposition of finely dispersed copper clusters occurring in the lubricating medium composition and forming a servovite film. As a result of studies, it is found that the dependence of the WSD size on the acid content in the base oil is nonmonotonic in nature with a significant minimum at a concentration of 0.1 mass. %. It is shown that the addition of 0.1 mass. % of hexanoic acid into the lubricant composition exhibits the smallest wear of the steel-steel tribological pair, the WSD decreases to 0.497 mm, the critical load (Рк) and the welding load (Рс) increase by 32% and 27%, respectively.

Keywords: friction coefficient, selective transfer, servovite film, wear scar, welding load, critical load

For citation: E.G. Drogan, V.E. Burlakova. Tribocontact surface exploration after friction in hexanoic acid solution. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 366−373. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-366-373

Введение. Вопросы трения и износа лежат в основе трибологии — науки о взаимодействии сопряжённых поверхностей контактирующих тел, находящихся в относительном движении. В авиакосмической и машиностроительной промышленности снижение трения и износа является одной из наиболее важных задач [1–3]. В настоящее время особое внимание для снижения трения и износа уделяется смазочным материалам с антифрикционными присадками, в качестве которых используются металлы или оксиды металлов с размерами частиц в нанодиапозоне [4–7]. Было установлено, что среди металлов, используемых в качестве модификаторов или металлоплакирующей добавки, медь проявляет большую тенденцию к снижению трения и износа в результате формирования на стальной поверхности металлической пленки с низкой прочностью на сдвиг на трущихся поверхностях [4]. Такая пленка при трении предотвращает прямой контакт стальных поверхностей. Исследования трибосопряженных поверхностей после трения на наноуровне выявляют зависимость эволюции коэффициента трения и износа трибопары от морфологии и физико-механических характеристик антифрикционной пленки [8, 9].

Необходимо отметить, что смазки на масляной основе с нанодобавками демонстрируют улучшенные трибологические характеристики, однако их использование неизбежно приводит к загрязнению окружающей среды. Повторное их использование является невозможным.

В связи с этим, целью данного исследования являлось изучение влияния добавок капроновой кислоты на трибологические характеристики пар трения при фрикционном взаимодействии в составах на водной основе и на основе вазелинового масла.

Материалы и методы. Эволюцию коэффициента трения системы «латунь 59–водный раствор карбоновой кислоты–сталь 40Х» исследовали на торцевой машине трения типа АЕ-5 со скоростью вращения 180 об/мин при осевой нагрузке 98 Н в течение 10 часов в лаборатории «Гибридные функциональные материалы на основе графена» НОЦ «Материалы». В качестве органической компоненты смазочной композиции использовали капроновую кислоту с концентрацией 0,025–0,5 моль/л.

Исследование противоизносных характеристик проводилось на ЧШМ в соответствие со стандартом ГОСТ 9490–75. Пара трения на ЧШМ сталь-сталь представляла собой точечные контакты шаров. Шары для испытаний изготавливались из стали ШХ-15 по ГОСТ 801–78, термически обрабатывались до твердости HRC 62–66. Диаметр шара d = 12,7 мм. При испытаниях на ЧШМ объективными параметрами смазывающих свойств смазочных композиций являлись: нагрузка сваривания ($P_с$); диаметр пятна износа ($D_и$), критическая нагрузка ($P_к$). Испытания на ЧШМ проводились в двух режимах: испытания в течение 3600 секунд при постоянной нагрузке для определения величины износа испытуемых образцов путем измерения диаметров пятна износа каждого из трех шаров с использованием микроскопа ММУ-1 №660002; испытания в течение 10 секунд при повышенной нагрузке до сваривания шаров для определения значений $P_к$, $P_с$. Полученные числовые значения аппроксимированы методом наименьших квадратов. В качестве смазочной композиции (эмульсии) для испытаний на ЧШМ использовали вазелиновое масло с добавлением различной концентрации капроновой кислоты. Испытания проводились при концентрации кислоты в базовом вазелиновом масле 0,025–05 моль/л.

Для определения толщины сервовитной пленки, полученной на поверхности трибоконтакта в результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь, а также параметров ее шероховатости использовали оптический профилометр Contour GT-K1 с аналитическим программным обеспечением Vision 64, установленном в РЦКП НОЦ «Материалы» (nano.donstu.ru). Измерения проводились методом вертикальной сканирующей интерферометрии (VSI) со скоростью сканирования 0,1 мкм/сек, при повторяемости RMS 0,01 нм.

Изучение топографии поверхности сервовитной пленки осуществлялось методом атомно-силовой микроскопии. Сканирование поверхности пленки проводили с использованием атомно-силового микроскопа марки PHYWE Compact в полуконтактном режиме монокристаллическим кремниевым зондом с алюминиевым покрытием.

Результаты исследования. Проведенные длительные эволюционные трибологические исследования пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты обнаруживают зависимость трибологических характеристик от концентрации кислоты в смазочной среде. Анализ изменения коэффициента трения пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты с концентрациями 0,025 и 0,05 моль/л выявляет достаточно низкие до 0,07 значения [8, 9]. Дальнейшее увеличение концентрации кислоты в составе смазки до 0,2 и 0,5 моль/л, напротив, приводит к увеличению коэффициента трения (рис. 1).

Как следует из полученных результатов, в период приработки трибопары наблюдается тенденция к снижению коэффициента трения. Однако при введении высокой концентрации кислоты инициируются также и коррозионные процессы на поверхности контакта. Использование капроновой кислоты в смазочной композиции с концентрацией 0,1 моль/л позволяет достичь наименьших значений коэффициента трения до 0,007 при длительных трибологических испытаниях, образования сервовитной пленки и перехода системы в режим безызносного трения [10, 11]. Одновременно с этим снижается износ пары трения латунь-сталь до 25 раз, а на трибосопряженных поверхностях в результате избирательного переноса при трении формируется медная пленка с различной шероховатостью и плотностью покрытия поверхности.

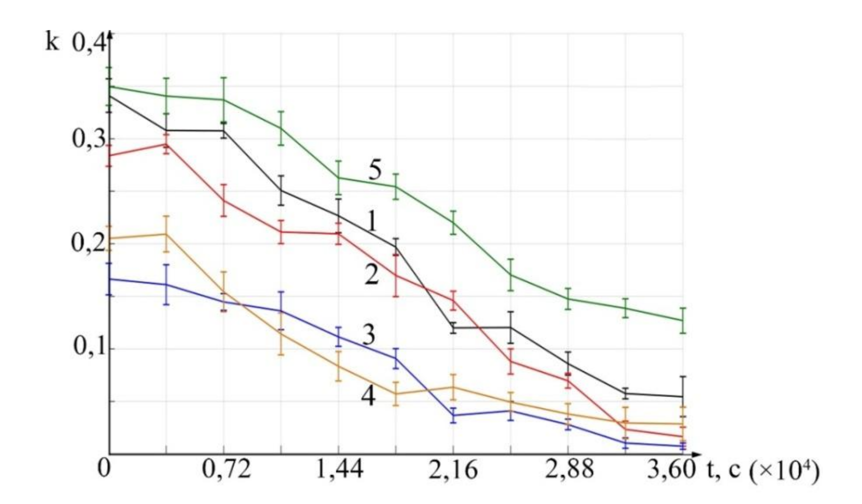


Рис. 1. Эволюция коэффициента трения в системе«латунь-водный раствор капроновой кислоты-сталь»
с концентрацией кислоты: 1 — 0,025 моль/л; 2 — 0,05 моль/л;
3 — 0,1 моль/л; 4 — 0,2 моль/л; 5 — 0,5 моль/л

Сравнение параметров шероховатости образующейся антифрикционной медной пленки при сканировании поверхности методом оптической профилометрии обнаруживает существенные отличия от исходной топографии. В результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено уменьшение шероховатости до R_a равное 69,4 нм (рис. 3), по сравнению с шероховатостью исходной поверхности трения R_a равно 118 нм (рис. 2).

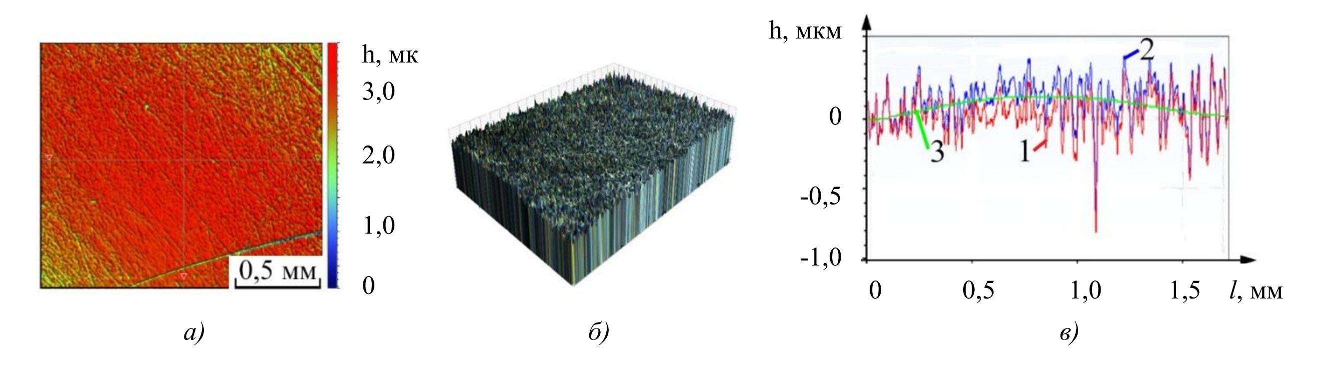


Рис. 2. Результаты исследования стальной поверхности до трения методом оптической профилометрии:
а — 2D-визуализация, б — 3D-визуализация, в — профиль поверхности. 1 — профиль шероховатости;
2 — профиль сканирования поверхности; 3 — профиль волнистости

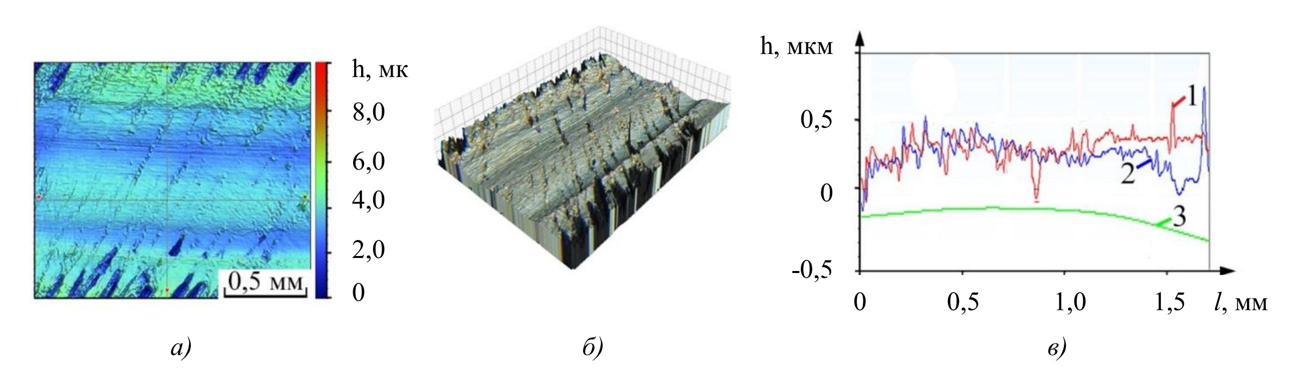


Рис. 3. Результаты исследования поверхности после трения методом оптической профилометрии:
а — 2D-визуализация; б — 3D-визуализация; в — профиль поверхности. 1 — профиль шероховатости;
2 — профиль сканирования поверхности; 3 — профиль волнистости

Поверхность после трения представляет собой расположенные параллельно направлению скольжения наноканавки, что характерно при образовании меньшего количества и размера частиц продуктов износа в смазке [12]. Такое состояние фрикционной системы приводит к существенному уменьшению коэффициента

трения. Известно [13–15], что наноразмерные неровности, как правило, оказывают меньшее влияние на износостойкость поверхности, чем их микронные аналоги из-за их почти бездефектной структуры. Кроме того, наличие наноразмерных неровностей способствует уменьшению площади контакта и увеличивает гидрофобность поверхности [16], что приводит к уменьшению сил сцепления при трении в водных растворах. В связи с этим наноструктурные пленки имеют огромный потенциал в процессах обеспечения снижения коэффициента трения и защиты поверхностей от износа.

Дальнейшее приближение к поверхности трения при анализе результатов атомно-силовой микроскопии показывает, что фрикционное взаимодействие пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты приводит к значительной модификации поверхности трения в результате осаждения мелкодисперсных кластеров меди, образующихся в составе смазочной среды [17] и формирующих сервовитную пленку (рис. 4).

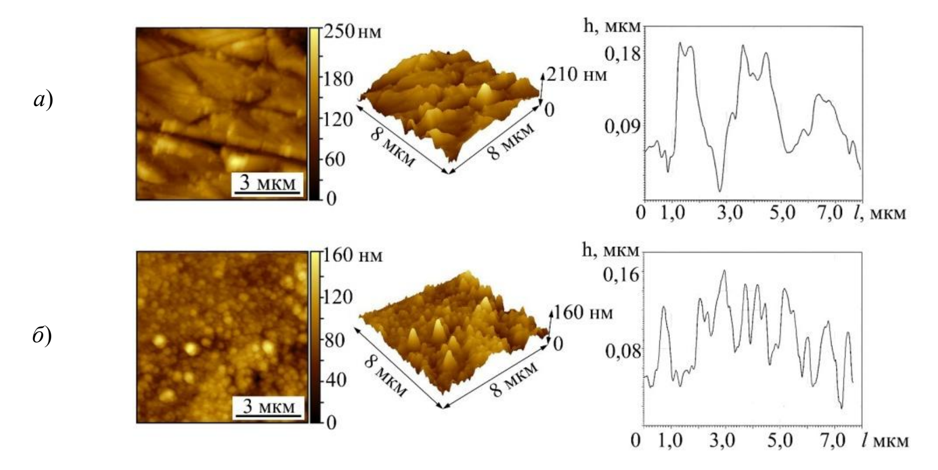


Рис. 4. Результаты атомно-силовой микроскопии поверхности образца:
а — до трения; б — после трения пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты

В результате визуализации обнаруживается, что стальная поверхность после фрикционного взаимодействия в водном растворе капроновой кислоты выглаживается, покрывается мелкозернистыми кластерами меди [18, 19] вследствие их адсорбции из состава рабочей среды на контртело (рис. 4). При этом слой, сформированный на поверхности, достаточно плотный, с малым разбросом частиц по размеру.

Для изучения влияния капроновой кислоты на противоизносные свойства смазочного материала интересно было рассмотреть пару трения сталь-сталь. Для этого использовали вазелиновое масло, в состав которого вводили от 0,025 до 0,5 масс. % капроновой кислоты в виде добавки. Результаты испытаний указывают на изменение трибологических параметров модифицированного масла. В результате исследований установлено, что зависимость размера диаметра пятна износа ($D_и$) от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. % (рис. 5). Добавление капроновой кислоты в состав смазочной композиции в качестве модифицирующей добавки обнаруживает наименьший износ трибопары при концентрации кислоты 0,1 масс. %. Диаметр пятна износа при этом снижается до 0,497 мм, в то время как диаметр пятна износа при трении пары сталь-сталь в чистом вазелиновом масле составляет 0,664 мм. При концентрации 0,025 масс. % и 0,5 масс. % отмечается ухудшение трибологических характеристик пары трения. При трении в базовом масле с добавлением капроновой кислоты с концентрацией 0,05 масс. % и 0,2 масс. % наблюдается лишь незначительное уменьшение диаметра пятна износа.

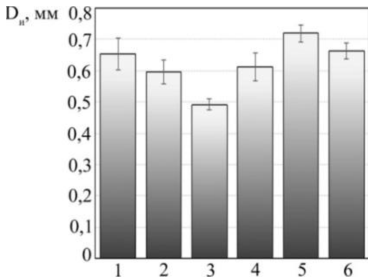


Рис. 5. Зависимость диаметра пятна износа ($D_и$) от концентрации капроновой кислоты в составе вазелинового масла:
1 — 0,025 масс. %, 2 — 0,05 масс. %, 3 — 0,1 масс. %, 3 — 0,2 масс. %, 5 — 0,5 масс. %,
6 — чистое вазелиновое масло

Исследование прочности модифицированной масляной пленки по нагрузочной способности смазочной композиции в сравнении с базовым маслом выявило изменение предельной несущей способности смазочного материала. При трении в вазелиновом масле с добавлением капроновой кислоты с концентрацией 0,025 масс. % наблюдается незначительное увеличение критической нагрузки в сравнении с чистым базовым маслом (рис. 6).

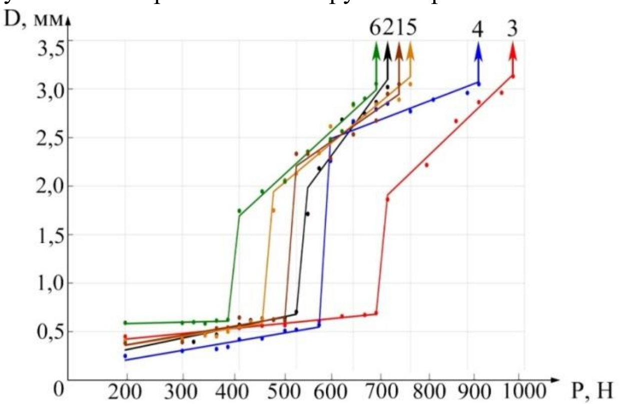


Рис. 6. Несущая и предельная нагрузочные способности вазелинового масла, модифицированного капроновой кислотой разной концентрации (С):
1 — чистое вазелиновое масло (ВМ); 2 — ВМ + 0,025 масс. %; 3 — ВМ + 0,05 масс. %; 4 — ВМ + 0,1 масс. %;
5 — ВМ + 0,2 масс. %; 6 — ВМ + 0,5 масс. %

При достижении критической нагрузки трущиеся поверхности пары сталь-сталь значительно нагреваются, адсорбционная пленка, образующаяся в базовом масле, разрушается, трение усиливается, а поверхности металла свариваются в точках их соприкосновения (рис. 6). Капроновая кислота, введенная в базовое масло, реагирует со стальной поверхностью трения, образуя на выступах контактирующих поверхностей более стойкую хемосорбционную пленку, предохраняющую поверхности от износа и уменьшающую трение в условиях высокой температуры и давления, благодаря чему трущиеся поверхности выравниваются, износ снижается.

Наилучший результат при трении пары сталь-сталь наблюдается в вазелиновом масле, модифицированном капроновой кислотой с концентрациями 0,05 и 0,1 масс. %, критическая нагрузка ($P_к$) при этом увеличивается на 32%, нагрузка сваривания ($P_с$) увеличивается на 27 % (рис. 5). Дальнейшее увеличение концентрации капроновой кислоты до 0,2 масс. % и 0,5 масс. % в составе смазочной композиции уже отрицательно сказывается на ее несущей и предельной нагрузочной способности.

Обсуждение и заключения. Полученные в работе результаты позволяют сформировать следующие выводы:

- В результате трибологических исследований пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено, что оптимальной молярной концентрацией кислоты в составе смазки является 0,1 моль/л.
- При фрикционном взаимодействии пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты на поверхностях трения формируется антифрикционная медная пленка, способствующая резкому снижению коэффициента трения до 0,007 и износа металлов пары трения до 25 раз.
- В результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено уменьшение шероховатости, по сравнению с исходной поверхностью трения.
- Обнаружено, что фрикционное взаимодействие пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты приводит к значительной модификации поверхности трения в результате осаждения мелкодисперсных кластеров меди, образующихся в составе смазочной среды, и формирующих сервовитную пленку.
- В результате исследований установлено, что зависимость размера диаметра пятна износа от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. %.
- Показано, что добавление 0,1 масс. % капроновой кислоты в состав смазочной композиции обнаруживает наименьший износ трибопары сталь-сталь, диметр пятна износа при этом снижается до 0,497 мм, критическая нагрузка ($P_к$) и нагрузка сваривания ($P_с$) увеличиваются на 32% и 27 % соответственно.

Библиографический список

1. Ludema, K. C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology / K. C. Ludema, L. Ajayi. — CRC press. — 2018. — 82 p.

2. Hutchings, I. Tribology: friction and wear of engineering materials / I. Hutchings, P. Shipway. — Butterworth Heinemann. — 2017. — 389 p.

3. Kato, K. Wear in relation to friction–a review / K. Kato // Wear. — 2000. — Vol. 241, no. 2. — P. 151–157. DOI : 10.1016/S0043-1648(00)00382-3

4. Liu, G. Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface / G. Liu [et al.] // Tribology Letters. — 2004. — Vol. 17. — P. 961–966. DOI: 10.1007/s11249-004-8109-6

5. A. Hernández Battez. CuO, ZrO2 and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricant / A. Hernández Battez [et al.] // Wear. — 2008. — Vol. 265. — P. 422–428. DOI : 10.1016/j.wear.2007.11.013

6. Uflyand, I. E. Metal chelate monomers based on nickel (II) cinnamate and chelating N-heterocycles as precursors of nanostructured materials / I. E. Uflyand [et al.] // Journal of Coordination Chemistry. — 2019. — Vol. 72, no. 5–7. — P. 796–813. DOI : 10.1080/00958972.2019.1587414

7. Peng T. The influence of Cu/Fe ratio on the tribological behavior of brake friction materials / T. Peng [et al.] // Tribology Letters. — 2018. —Vol. 66, no. 1. — P. 18. DOI : 10.1007/s11249-017-0961-2

8. Механические свойства сервовитных пленок, формирующихся при трении в водных растворах карбоновых кислот / В. Э. Бурлакова [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, №. 3. — С. 280–288. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-3-280-288

9. Menezes, P. L. Role of surface texture, roughness, and hardness on friction during unidirectional sliding / P. L. Menezes [et al.] // Tribology letters. — 2011. — Vol. 41(1). — P. 1–15. DOI : 10.1007/s11249-010-9676-3

10. Бурлакова, В. Э. Трибологические возможности пары трения латунь-сталь в водных растворах органических кислот / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган, Д. Ю. Геращенко // Трибология-машиностроению: сб. трудов XII междунар. науч.-техн. конф. — Ижевск, 2018. — С. 92–95.

11. Бурлакова, В. Э. Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №. 1. — С. 24–30. DOI : 10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30

12. Gerberich, W. W. Superhard silicon nanospheres / W. W. Gerberich [et al.] // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2003. — Vol. 51, no. 6. — P. 979-992. DOI : 10.1016/S0022-5096(03)00018-8

13. Saurín, N. Study of the effect of tribomaterials and surface finish on the lubricant performance of new halogen-free room temperature ionic liquids / N. Saurín [et al.] // Applied Surface Science. —2016. — Vol. 366. — P. 464-474. DOI : 10.1016/j.apsusc.2016.01.127

14. Jansons, E. The Impact of Ice Texture on Coefficient of Friction for Stainless Steel with Different Surface Roughness. Key Engineering Materials / E. Jansons, K. A. Gross // Trans Tech Publications. —2019. —Vol. 800. — P. 308-312 DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308

15. Qin, W. Effects of surface roughness on local friction and temperature distributions in a steel-on-steel fretting contact / W. Qin [et al.] // Tribology International. — 2018. — Vol. 120. — P. 350–357. DOI : 10.1016/j.triboint.2018.01.016

16. Choi, C. H. Nanoturf surfaces for reduction of liquid flow drag in microchannel / C. H. Choi, J. Kim, C.J. Kim // ASME 3rd Integrated Nanosystems Conference. American Society of Mechanical Engineers. — 2004. — P. 47–48. DOI : 10.1115/NANO2004-46078

17. Burlakova, V. E. Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly / V. E. Burlakova [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2018. — Vol. 12, no. 6. — P. 1108–1116. DOI : 10.1134/S1027451018050427

18. Влияние состава смазочной среды на структуру поверхностных слоев формирующейся при трении сервовитной пленки / В. Э. Бурлакова [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2019. — №. 4. — С. 91–99. DOI : 10.1134/S0207352819040061

19. Wolff, C. A. newly developed test method for characterization of frictional conditions in metal forming / C. Wolff, O. Pawelski, W. Rasp // Proceedings of the Eighth International Conference on Metal Forming. — Krakow. — 2000. — P. 91–97.

Сдана в редакцию 30.09.2019
Принята к публикации 02.12.2019

Об авторах:

Бурлакова Виктория Эдуардовна,
заведующая кафедрой «Химия» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3779-7079
vburlakova@donstu.ru

Дроган Екатерина Геннадьевна,
старший преподаватель кафедры «Химия» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4002-2082
ekaterina.drogan@gmail.com

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 374–381. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 374–381. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.825.54 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-374-381

Повышение стабильности функционирования рабочего органа в кривошипных прессах[*]

К. О. Кобзев[1**]
[1]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Increasing stable operation of the working body in crank presses [***]

K. O. Kobzev[1**]
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Исследованы статическая и динамическая системы нагружения предохранительной фрикционной муфты (ПФМ). Синтезирована принципиальная схема фрикционного контакта твердых тел в кузнечно-штамповочных машинах. С точки зрения исследования процесса повышения стабильного функционирования рабочего органа в кривошипных прессах рассмотрены следующие факторы: время срабатывания, текущий коэффициент трения и изменение вращающего момента при статическом и динамическом нагружении предохранительной муфты.
Материалы и методы. Определено время срабатывания ПФМ, имеющей дифференцированные пары трения. Искомый показатель соответствует участку рабочего времени, на котором усиливается нагружение (между значениями номинального вращающего момента и момента срабатывания). Параметры системы, состоящей из двух масс, соответствуют параметрам эквивалентной системы, включающей муфту и ключевые части привода. Элементы системы: масса инерции; масса инерции, включающая ротор двигателя и основную (ведущую) часть ПФМ; упругая связь с указанным значением приведенной угловой жесткости.
Результаты исследования. Определены значения нагрузки, возникающей в упругих связях, не обусловленных функционированием рабочих органов. Представлены формулы, которые следует использовать для определения значений движущего момента и обобщенных координат. Описаны условия старта при увеличении значения нагрузки от начальных показателей.
Обсуждение и заключения. Найдена зависимость для вычисления минимального числа пар трения основной фрикционной группы. Показано, что при этом минимуме коэффициент усиления, используемый для реализации «идеальной» нагрузочной характеристики ПФМ, не превышает предельно допустимое значение, даже если величина коэффициента трения максимальна. Представлена принципиальная модель ПФМ, в которой при минимальном значении коэффициента трения отрицательная обратная связь не действует. В принципиальной схеме модернизации

Introduction. Static and dynamic loading systems of the safety friction clutch (SFC) are investigated. A schematic diagram of the frictional contact of solids in the forging and stamping machines is synthesized. From the point of view of increasing the operational stability of the working body in crank presses, the following factors are considered: response time, current friction factor and a change in torque under static and dynamic loading of the safety clutch.
Materials and Methods. The response time of the SFC with differentiated friction pairs is determined. The sought indicator corresponds to the period of the uptime in which the load is amplified (between values of the rated torque and the response time). The parameters of a dual-mass system correspond to the parameters of an equivalent system that includes a clutch and key parts of the drive. The system elements include mass of inertia; mass of inertia including the engine rotor and the main (driving) part of the SFC; elastic connection with the specified value of the reduced angular stiffness.
Research Results. Values of the load arising in elastic bonds not conditioned by the working body operation are specified. Formulas that should be used to determine the values of the driving moment and generalized coordinates are presented. Start conditions with an increase in the load value from the initial indicators are described.
Discussion and Conclusions. The dependence is found for calculating the minimum number of friction pairs of the basic friction group. It is shown that at this minimum, the gain used to implement an "ideal" SFC load characteristic, does not exceed the maximum permissible value, even if the value of the friction coefficient is maximum. A fundamental SFC model is presented, in which, with a minimum value of the friction coefficient, negative feedback does not work. In the functional

[*]Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**]E-mail: 5976765@mail.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

базового варианта ПФМ для повышения точности срабатывания и номинальной нагрузочной способности отсутствует отрицательная обратная связь при минимальном значении коэффициента трения.

diagram of the basic SFC version modernization, there is no negative feedback with a minimum value of the friction coefficient in order to increase the accuracy of operation and the rated load capacity.

Ключевые слова: кривошипный пресс, коэффициент трения, рабочий механизм, коэффициент усиление, перегрузка, точность.

Keywords: crank press, friction coefficient, working mechanism, gain factor, overload, accuracy

Образец для цитирования: Кобзев, К. О. Повышение стабильности функционирования рабочего органа в кривошипных прессах / К. О. Кобзев // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 374−381. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-374-381

For citation: K.O. Kobzev. Increasing stable operation of the working body in crank presses. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 374−381. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-374-381

Введение. На современном этапе развития производства актуально повышение надежности и увеличение срока эксплуатации производственного оборудования. В частности, представляет интерес исследование статической и динамической систем нагружения предохранительной фрикционной муфты. В рамках данной работы исследована статическая и динамическая системы нагружения предохранительной фрикционной муфты. Синтезирована принципиальная схема фрикционного контакта твердых тел в кузнечно-штамповочных машинах. С точки зрения исследования процесса повышения стабильной работы рабочего органа в кривошипных прессах рассмотрены следующие факторы: время срабатывания, текущий коэффициент трения и изменение вращающего момента при статическом и динамическом нагружении предохранительной муфты.

Материалы и методы. Определим время срабатывания предохранительной фрикционной муфты (ПФМ), имеющей дифференцированные пары трения. Искомый показатель соответствует участку рабочего времени, на котором усиливается нагружение, — между значениями $T_{\text{н}}$ (номинальный вращающий момент) и T_i (момент срабатывания). Параметры системы, состоящей из двух масс, соответствуют параметрам эквивалентной системы, включающей муфту и ключевые части привода (рис. 1).

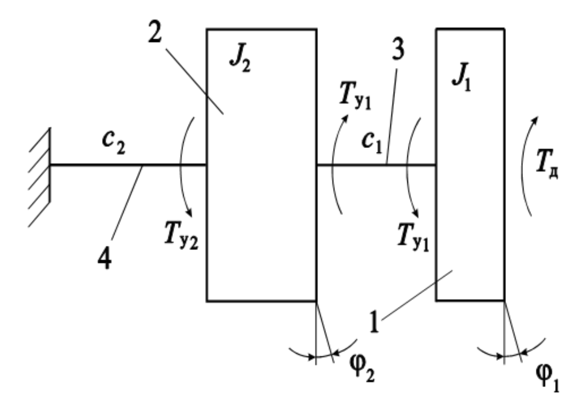


Рис. 1. Расчетная динамическая схема 1

Составные части системы:
— масса инерции (эквивалентная система подведена к основному (ведущему) валу ПФМ (позиция 1 на рис. 1.);
— масса инерции, включающая ротор двигателя и основную (ведущую) часть ПФМ (позиция 2 на рис. 1);
— упругая связь с указанным значением приведенной угловой жесткости c_1 и c_2 соответственно (позиции 3 и 4 на рис. 1).

Установим, что значение демпфирования в этой системе и в ПФМ низкое, и его не следует использовать. Значение приведенного момента сил сопротивления равно $T_{\text{н}}$. Учитывая эти факторы, получаем уравнения движения [1]:

$$J_1\ddot{\phi}_1 + c_1(\phi_1 - \phi_2) = T_{\text{д}}, \quad (1)$$

$$J_2\ddot{\phi}_2 + c_2\phi_2 = c_1(\phi_1 - \phi_2), \quad (2)$$

Машиностроение и машиноведение

где J_1, J_2 — значения приведенных моментов инерции соответственно ПФМ и неосновной (ведомой) части привода; $T_д$ — значение движущего момента; ϕ_1, ϕ_2 — значения обобщенных координат движения системы (значения углов поворота масс инерции соответственно 1 и 2).

Уравнения (1) и (2) показывают, что двигатель обладает необходимым ресурсом значения мощности и $\phi_1 = \omega t$ (ω — значение угловой скорости движения масс инерции 1, $\omega = \text{const}$, t — значение времени) [2–5].

Введем данные условия в уравнение (2):

$$\ddot{\phi}_2 + \frac{c_1 + c_2}{J_2}\phi_2 = \frac{c_1}{J_2}\omega t .$$

В итоге запишем:

$$\phi_2 = A\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + B\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + \frac{c_1}{c_1 + c_2}\omega t.$$

Значения постоянных интегрирования A и B необходимо вычислять при указании начальных значений: при $t = 0$ $\phi_2 = T_н / c_2$, $\dot{\phi}_2 = \omega$. Тогда

$$B = \frac{T_н}{c_2};\ A = \frac{c_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}} .$$

Отсюда

$$\phi_2 = \frac{c_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + \frac{T_н}{c_2}\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + \frac{c_1}{c_1 + c_2}\omega t .$$

Значения нагрузок, которые получают упругие связи 3 и 4, равны:

$$T_1 = c_1(\phi_1 - \phi_2) = \frac{c_1 c_2 \omega t}{c_1 + c_2} - \frac{c_1 c_2 \omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t - \frac{c_1}{c_2}T_н\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t , \quad (3)$$

$$T_2 = c_2\phi_2 = \frac{c_1 c_2 \omega t}{c_1 + c_2} + \frac{c^2{}_2\omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t + T_н\cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t , \quad (4)$$

$$\sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 0 ,\ \cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 1 \text{ или } \sin\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 1 ,\ \cos\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}}t = 0 . \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение:

$$\frac{c_1 c_2 \omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}} = \frac{c_1}{c_2}T_н . \quad (6)$$

Единственное действительное значение решения уравнения (6):

$$c_1 = c_2\left(\sqrt[3]{\frac{c_2 J_2 \omega^2}{T^2{}_н}} - 1\right). \quad (7)$$

Анализ кубического уравнения

$$c^3{}_1 + 3c^2{}_1 c_2 + 3c_1 c^2{}_2 + c^3{}_2 - \frac{c^4{}_2 J_2 \omega^2}{T^2{}_н} = 0$$

позволяет сделать следующее утверждение: при значениях переменных c_1, меньших, чем значение переменной, вычисленной по (6), значение левой части (7) намного больше правой [6–8]. При указанных в (3) тригонометрических функциях с возможным уменьшением c_1 увеличивается значение амплитуды колебаний по синусоиде $\left(c_1 c_2 \omega\sqrt{J_2 / (c_1 + c_2)} / (c_1 + c_2)\right)$ и уменьшается значение амплитуды колебаний по косинусоиде $(c_1 T_н / c_2)$.

$$c_1 < c_2\left(\sqrt[3]{\frac{c_2 J_2 \omega^2}{T^2{}_н}} - 1\right). \quad (8)$$

Отрезок времени, когда значение момента упругой связи 3 является идентичным $T_п$:

$$t_{\text{с}} = \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2 \omega}\left(T_{\text{п}} + \frac{c_1}{c_2} T_{\text{н}}\right). \tag{9}$$

Тогда $\sin\sqrt{(c_1 + c_2)t_{\text{с}} / J_2} = 0$; $\cos\sqrt{(c_1 + c_2)t_{\text{с}} / J_2} = 1$, вследствие чего находим:

$$\sqrt{(c_1 + c_2)t_{\text{с}} / J_2} = 2\pi n,$$

где $n = 0, 1, 2, \ldots, n$.

Учитывая (9), запишем:

$$(c_1 + c_2)\sqrt{c_1 + c_2}\left(T_{\text{п}} + \frac{c_1}{c_2} T_{\text{н}}\right) = 2\pi n J_2 c_1 c_2 \omega. \tag{10}$$

Для жестких ПФМ $\left(c_1 > c_2\left(\sqrt[3]{c_2 J_2 \omega^2 / T^2_{\text{н}}} - 1\right)\right)$ используем выражение $\sin\sqrt{(c_1 + c_2)t_{\text{с}} / J_2} = 1$, $\cos\sqrt{(c_1 + c_2)t_{\text{с}} / J_2} = 0$. При этом

$$t_{\text{с}} = \frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2 \omega}\left(T_{\text{п}} + \frac{c_1 c_2 \omega}{c_1 + c_2}\sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}\right). \tag{11}$$

В данном уравнении угловая жесткость ПФМ:

$$\sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_2}} t_{\text{с}} = \frac{\pi}{2} + 2\pi n.$$

Значение можно получить в форме аналитического итога:

$$c_1 = \sqrt[3]{c_2^2(3c_2 - G) - \left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 + \left\{\left[c_2^2 - \left(\frac{c_2}{3} - \frac{G}{9}\right)\right]^3 + \left[\left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 - c_2^2\left(3c_2 - G\right)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}} +$$

$$+\sqrt[3]{c_2^2(3c_2 - G) - \left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 - \left\{\left[c_2^2 - \left(\frac{c_2}{3} - \frac{G}{9}\right)\right]^3 + \left[\left(c_2 - \frac{G}{3}\right)^3 - c_2^2\left(3c_2 - G\right)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}} - c_2 + G.$$

В результате $G = J_2 c_2^2 \omega^2 \left(\pi / 2 + 2\pi n - 1\right)^2 / T^2_{\text{п}1}$. Зная c_1 и $t_{\text{с}}$, найдем значения вращающих моментов, действующих на упругую связь 4. Для этого используем представленные ниже зависимости [6–9].

— Предохранительная фрикционная муфта (упругий вид):

$$T'_2 = T_{\text{п}1} + \frac{c_1 + c_2}{c_2} T_{\text{н}}. \tag{12}$$

— Предохранительная фрикционная муфта (жесткий вид):

$$T''_2 = T_{\text{п}1} + c_2 \omega \sqrt{\frac{J_2}{c_1 + c_2}}. \tag{13}$$

По итогам выполненных вычислений необходимо сделать ряд замечаний. С увеличением c_2 сокращается значение момента, возникающего на упругой связи 4 (упругая муфта). Если c_2 растет, увеличивается и вращающий момент T''_2 (жесткая муфта).

Рассмотрим типы нагрузки привода. Важно учесть, что до срабатывания предохранительной фрикционной муфты перегрузка не является причиной остановки рабочих органов машины (рис. 2).

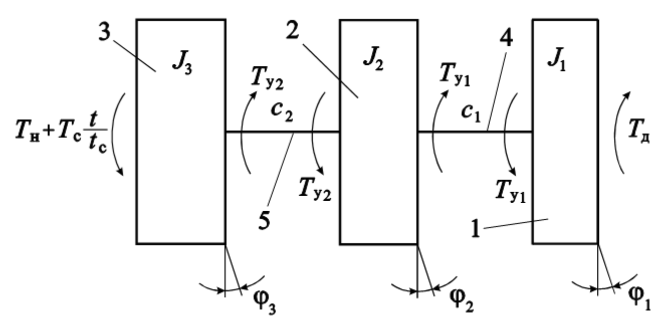


Рис. 2. Расчетная динамическая схема 2

Уравнения для данной системы:

$$J_1\ddot{\phi}_1 + c_1(\phi_1 - \phi_2) = T_д\,, \tag{14}$$

$$J_2\ddot{\phi}_2 - c_1(\phi_1 - \phi_2) + c_2(\phi_2 - \phi_3) = 0\,, \tag{15}$$

$$J_3\ddot{\phi}_3 - c_2(\phi_2 - \phi_3) = -T_н - T_с\frac{t}{t_с}\,. \tag{16}$$

Здесь ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 — обобщенные угловые координаты масс инерции 1, 2 и 3; $T_с$ — значение возможного роста вращающего момента в устройстве рабочего органа; $t_с$ —время (связано со значением скорости роста перегрузки и $T_с$). Значение вращающего момента $T_с$ (зависит от типа технологической машины и возможностей ее применения) записывается в виде: $(1,2...4)T_н$ [10–13]. Рабочий орган имеет резерв мощности, и значение угловой скорости масс инерции 1 принято неизменным, т. е. $\phi_1 = \omega t$. В этом случае, учитывая (16), получим [13]:

$$c_1(\phi_1 - \phi_2) = T_д\,.$$

Выполним суммирование:

$$J_2\ddot{\phi}_2 + (c_1 + c_2)\phi_2 - c_1\omega t - c_2\phi_3 = 0\,. \tag{17}$$

Суммируем (15) и (16):

$$J_2\ddot{\phi}_2 - c_1\omega t + c_1\phi_2 + J_3\ddot{\phi}_3 = -T_н - T_с\frac{t}{t_с}\,. \tag{18}$$

Дважды дифференцируем (16):

$$J_2\frac{d^4\phi_2}{dt^4} + (c_1 + c_2)\frac{d^2\phi_2}{dt^2} - c_2\frac{d^2\phi_3}{dt^2} = 0\,. \tag{19}$$

Используя (18), получим:

$$\frac{d^2\phi_3}{dt^2} = \frac{1}{J_3}\left(c_1\omega t - c_1\phi_2 - T_н - T_с\frac{t}{t_с}\right) - \frac{J_2}{J_3}\frac{d^2\phi_2}{dt^2}\,.$$

Подставим последнее выражение в (16):

$$\frac{d^4\phi_2}{dt^4} + \frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{J_2J_3}\frac{d^2\phi_2}{dt^2} + \frac{c_1c_2}{J_2J_3}\phi_2 = \frac{c_2}{J_2J_3}\left(c_1\omega t - T_н - T_с\frac{t}{t_с}\right). \tag{20}$$

Из (20) находим:

$$\phi_2 = \frac{1}{c_2}\left(J_3\frac{d^2\phi_3}{dt^2} + c_2\phi_3 + T_н + T_с\frac{t}{t_с}\right). \tag{21}$$

Дважды дифференцируя (21), получим:

$$\frac{d^2\phi_2}{dt^2} = \frac{1}{c_2}\left(J_3\frac{d^4\phi_3}{dt^4} + c_2\frac{d^2\phi_3}{dt^2}\right). \tag{22}$$

Подставим (22) и (21) в (18):

$$\frac{d^4\phi_3}{dt^4} + \frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{J_2J_3}\frac{d^2\phi_3}{dt^2} + \frac{c_1c_2}{J_2J_3}\phi_3 = \frac{c_2}{J_2J_3}\left[c_1\omega t - \frac{c_1 + c_2}{c_2}\left(T_н + T_с\frac{t}{t_с}\right)\right]. \tag{23}$$

Запишем общие решения уравнений (22) и (23):

$$\phi_2 = A_1\sin k_1t + B_1\cos k_1t + C_1\sin k_2t + D_1\cos k_2t + \frac{1}{c_1}\left(c_1\omega t - T_н - T_с\frac{t}{t_с}\right), \tag{24}$$

$$\varphi_3 = A_2\sin k_1t + B_2\cos k_1t + C_2\sin k_2t + D_2\cos k_2t + \frac{1}{c_1 + c_2}\left[c_1\omega t - \frac{c_1 + c_2}{c_2}\left(T_н + T_с\frac{t}{t_с}\right)\right]. \tag{25}$$

Здесь

$$k_{1,2} = \sqrt{\frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{2J_2J_3} \pm \sqrt{\left[\frac{c_2J_2 + (c_1 + c_2)J_3}{2J_2J_3}\right]^2 - \frac{c_1c_2}{J_2J_3}}}\,.$$

Результаты исследования. Используя выражения (22) и (23), найдем значения нагрузки, возникающей в упругих связях, не представленных в (18). В этом случае используем значения движущего момента $T_д$, равного $(\phi_1-\phi_2)(t)$. Наличие момента $T_н$ позволяет записать обобщенные координаты: $\phi_1-\phi_2=T_н/c_1$, $\phi_2-\phi_3=T_н/c_2$, $\phi_1=\omega t$. Опишем условия старта при увеличении нагрузки (от начальных показателей): при $t=0$ $\phi_2=-T_н/c_1$, $d\phi_2/dt=\omega$; $\phi_3=-(c_1+c_2)T_н/c_1c_2$, $d\phi_3/dt=\omega$. Учитывая (17) и (18) и стартовые условия, получим (при $t=0$):

$$\frac{d^2\phi_2}{dt^2}=-\frac{c_2}{J_2c_1}T_н;\ \frac{d^3\phi_2}{dt^3}=0;\ \frac{d^2\phi_3}{dt^2}=\frac{c_2-2c_1}{J_3c_1}T_н;\ \frac{d^3\phi_3}{dt^3}=0.$$

Используем стартовые условия, полученные показатели и основные выражения (22) и (23). Получим значения постоянных процесса интегрирования:

$$A_1=-\frac{k^2{}_2T_с}{k_1(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1t_с};\ B_1=\frac{T_нc_2}{c_1J_2(k^2{}_1-k^2{}_2)};$$

$$C_1=\frac{k^2{}_1T_с}{k_2(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1t_с};\ D_1=-\frac{T_нc_2}{c_1J_2(k^2{}_1-k^2{}_2)};$$

$$A_2=-\frac{k^2{}_2}{k_1(k^2{}_1-k^2{}_2)}\times\frac{(c_1+c_2)T_с}{c_1c_2t_с};\ B_2=-\frac{T_н(c_2-2c_1)}{c_1J_3(k^2{}_1-k^2{}_2)};$$

$$C_2=\frac{k^2{}_1}{k_2(k^2{}_1-k^2{}_2)}\times\frac{(c_1+c_2)T_с}{c_1c_2t_с};\ D_2=\frac{T_н(c_2-2c_1)}{c_1J_3(k^2{}_1-k^2{}_2)}.$$

Подставим значения, полученные после интегрирования, в (22) и (23):

$$\phi_2=\frac{1}{(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1}\left[\frac{T_с}{t_с}\left(\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t-\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{T_нc_2}{J_2}(\cos k_1t-\cos k_2t)\right]+\frac{1}{c_1}\left(c_1\omega t-T_н-T_с\frac{t}{t_с}\right);$$

$$\varphi_3=\frac{1}{(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1}\left[\frac{(c_1+c_2)T_с}{c_2t_с}\left(\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t-\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{(c_2-2c_1)T_н}{J_3}(\cos k_2t-\cos k_1t)\right]+\frac{1}{c_1+c_2}\left[c_1\omega t-\frac{c_1+c_2}{c_2}\left(T_н+T_с\frac{t}{t_с}\right)\right].$$

Значения вращающих моментов, воспринимаемых упругими связями 4 и 5:

$$T_1=(\phi_1-\phi_2)c_1=\frac{1}{k^2{}_1-k^2{}_2}\left[\frac{T_с}{t_с}\left(\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t-\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t\right)-\right.$$
$$\left.-\frac{T_нc_2}{J_2}(\cos k_1t-\cos k_2t)\right]+T_н+T_с\frac{t}{t_с}; \quad (26)$$

$$T_2=(\phi_2-\phi_3)c_2=\frac{c_2}{(k^2{}_1-k^2{}_2)c_1}\left[T_н\left(\frac{c_2}{J_2}+\frac{c_2-2c_1}{J_3}\right)(\cos k_1t-\cos k_2t)-\right.$$
$$\left.-\frac{T_сc_1}{c_2t_с}\left(\frac{k^2{}_1}{k_2}\sin k_2t-\frac{k^2{}_2}{k_1}\sin k_1t\right)\right]+\frac{c^2{}_2}{c_1+c_2}\omega t+\frac{c_1-c_2}{c_1}\left(T_н+T_с\frac{t}{t_с}\right). \quad (27)$$

Значения k_1t и k_2t не связаны друг с другом. Значения $\sin k_1t$, $\sin k_2t$, $\cos k_1t$, $\cos k_2t$ могут быть положительными или отрицательными: $\sin k_1t=1$ и $\sin k_2t=-1$ или $\cos k_1t=-1$ и $\cos k_2t=1$ [10–12]. Значения этих временных промежутков находятся из (27):

$$t_1=(T_п-T_н)\frac{t_с}{T_с}-\frac{k^3{}_1+k^3{}_2}{k_1k_2(k^2{}_1-k^2{}_2)}, \quad (28)$$

$$t_2=\frac{t_с}{T_с}\left\{T_п-\left[\frac{2c_2}{(k^2{}_1-k^2{}_2)J_2}+1\right]T_н\right\}. \quad (29)$$

Подставив (27) и (28) в (29), получим значения взаимосвязанных вращающих моментов в упругой связи 5 [13]:

$$T'_2 = \frac{(k^3_1 + k^3_2)c_2}{k_1 k_2 (k^2_1 - k^2_2)}\left(\frac{T_с}{c_1 t_с} - \frac{c_2 \omega}{c_1 + c_2}\right) + (T_п - T_н)\frac{t_с}{T_с}\left[\frac{c^2_2 \omega}{c_1 + c_2} + \frac{(c_1 - c_2)T_с}{c_1 t_с}\right] + \frac{c_1 - c_2}{c_1}T_н , \quad (30)$$

$$\begin{aligned} T''_2 = \frac{t_с}{T_с}\left\{T_п - \left[1 + \frac{2c_2}{(k^2_1 - k^2_2)J_2}\right]T_н\right\}\left[\frac{c^2_2 \omega}{c_1 + c_2} + \frac{(c_1 - c_2)T_с}{c_1 t_с}\right] + \\ + T_н\left[\frac{c_1 - c_2}{c_1} - \frac{2c_2}{(k^2_1 - k^2_2)c_1}\left(\frac{c_2}{J_2} + \frac{c_2 - 2c_1}{J_3}\right)\right]. \end{aligned} \quad (31)$$

Используем выражение для вычисления распорной силы [13], чтобы получить максимальное значение вращающего момента, который передает предохранительная фрикционная муфта при увеличении наружного момента до T_i :

$$F_р = \frac{T_i - T'_2}{r}\mathrm{tg}\alpha .$$

Используем это выражение, чтобы найти вращающий момент T'_2 :

$$T'_2 = R_{ср} f_i \left(F_п - \frac{T_i - T'_2}{r}\mathrm{tg}\alpha\right).$$

Учтем значение для полного вращающего момента $T_п$ ПФМ и получим $T_п = T_i$. Таким образом, к окончанию 2-го временного отрезка $t_1 \ldots\ t_2$, когда завершается распределение нагрузки в предохранительной фрикционной муфте, оказываются одинаковыми значения момента трения и наружного вращающего момента.

Обсуждение и заключения. Найдена зависимость для вычисления минимального числа пар трения основной фрикционной группы. Показано, что при этом минимуме коэффициент усиления, используемый для реализации «идеальной» нагрузочной характеристики ПФМ, не превышает предельно допустимое значение, даже если величина коэффициента трения максимальна. Представлена принципиальная модель ПФМ, в которой при минимальном значении коэффициента трения отрицательная обратная связь не действует. В принципиальной схеме модернизации базового варианта ПФМ для повышения точности срабатывания и номинальной нагрузочной способности отсутствует отрицательная обратная связь при минимальном значении коэффициента трения.

Библиографический список

1. Брауде, В. И. Системные методы расчета грузоподъемных машин / В. И. Брауде, М. С. Тер-Мхитаров. — Ленинград : Машиностроение, 1985. — С. 181–205.

2. Кочаев, В. П. Расчеты деталей машин конструкций на прочность и долговечность / В. П. Кочаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — Москва : Машиностроение, 1985. — 224 с.

3. Афанасьев, М. К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки : автореф. дис ... канд. техн. наук / М. К. Афанасьев. — Киев, 1971. — 21 с.

4. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки / Я. И. Есипенко [и др.]. — Киев : Техніка, 1972. — С. 168–175.

5. Запорожченко, Р. М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания / Р. М. Запорожченко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 1971. — № 1. — С. 48–52.

6. Запорожченко, Р. М. К вопросу об эффективности фрикционных предохранительных муфт с точки зрения снижения веса приводов / Р. М. Запорожченко // Вестник Харьков. политехн. ин-та. — 1971. — Вып. I.XIV, № 58. — С. 16–19.

7. Шишкарев, М. П. Исследование точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт с комбинированной обратной связью (часть 2) [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев, К. О. Кобзев // Науковедение. — 2013. — № 4 (17). — Режим доступа : http://naukovedenie.ru/PDF/03tvn413.pdf (дата обращения : 28.10.2019).

8. Шишкарев, М. П. Синтез принципиальной схемы модернизированного варианта адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев, К. О. Кобзев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2. — Режим доступа : http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1738 (дата обращения : 28.10.2019).

9. Шишкарев, М. П. Элементы теории отрицательно-нулевой обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах / М. П. Шишкарев, К. О. Кобзев // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2014. — № 1. — С. 180–191.

10. Основы методологии расчета и проектирования адаптивных фрикционных муфт с раздельным силовым замыканием [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев [и др.] // Науковедение. — 2013. — № 5. — Режим доступа : http://www.naukovedenie.ru/PDF/17tvn513.pdf (дата обращения : 28.10.2019).

11. Специфика методик расчета и проектирования адаптивных фрикционных муфт с раздельным силовым замыканием [Электронный ресурс] / М. П. Шишкарев [и др.] // Науковедение. — 2013. — № 5. — Режим доступа : http://www.naukovedenie.ru/PDF/18tvn513.pdf (дата обращения : 28.10.2019).

12. Clutch adjustment mechanism : patent [Электронный ресурс] / J. M. Chapman, T. C. Mounce ; Ace Mfg & Parts Co // Justia patents. — Режим доступа : https://patents.justia.com/patent/8047351#history (дата обращения : 28.10.2019).

13. Lubrication controlling method for starling clutch : patent [Электронный ресурс] / Tomoyuki Miyazaki [et al.] ; NSK-Warner K. K. // patents.google.com. — Режим доступа : https://patents.google.com/patent/US8037990 (дата обращения : 28.10.2019).

Сдана в редакцию 16.09.2019
Принята к публикации 15.11.2019

Об авторе:

Кобзев Кирилл Олегович,
доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5633-3352
5976765@mail.ru

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 382–388. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 382–388. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.87 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-382-388

Автоматизация процесса многокритериального ранжирования студентов с помощью электронного портфолио*

Л. А. Пономарева[1], О. Н. Ромашкова[2], А. Н. Белякова[3], В. С. Заболотникова[4]**
[1,2,3,4] Московский городской педагогический университет, институт цифрового образования, Москва, Российская Федерация

Automation of multicriteria ranking of students using ePortfolio***

L. A. Ponomareva[1], O. N. Romashkova[2], A. N. Belyakova[3], V. S. Zabolotnikova[4]**
[1,2,3,4] Moscow City University, Institute of Digital Education, Moscow, Russian Federation

Введение. Работа посвящена повышению качества управления образовательной организацией за счет автоматизации персонифицированного сбора, хранения и ранжирования данных. Авторами разработан модуль корпоративной системы вуза — электронное портфолио студентов, в котором реализован метод многокритериальной оптимизации для расчета рейтинга обучающихся на основе собранных и хранящихся данных. Объектом исследования являются методы многокритериального ранжирования. Предметом исследования является автоматизированный расчет рейтинга студента в рамках электронного портфолио. Целью исследования является разработка инструментария для сбора, хранения и обработки данных об индивидуальных достижениях студентов и реализация математического метода многокритериальной оптимизации для ранжирования обучающихся на основе данных портфолио. Практическая значимость исследования — предоставить инструмент для эффективного управления учебным процессом.
Метод и инструментарий. Представлен прототип модуля корпоративной системы вуза «Электронное портфолио» на платформе «1С: Предприятие 8.3». Для ранжирования студентов в блоке модуля анализа данных реализован частный случай метода ранжирования альтернатив — попарное сравнение по степени их относительной важности. При этом использовалась унифицированная шкала отношений.
Результаты исследования. Авторы описали схему функционирования информационной системы (ИС) «Электронное портфолио», представили схему взаимодействия процессов по формированию портфолио, а также схему бизнес-процессов при расчете индивидуального рейтинга. Показан фрагмент выборки, на которой проводилась проверка работоспособности блока многокритериальной оптимизации. Описаны критерии, принимающие участие в расчетах, а также правило отбора альтернатив для нахождения оптимального решения.

Introduction. The paper considers improving the management quality of an educational organization through automating the personalized data collection, storage and ranking. The authors have developed a module of the university corporate system, an ePortfolio of students, which implements a multicriteria optimization method for calculating the students' rating on the basis of the collected and stored data.
The study object is multicriteria ranking methods. The subject of the study is the automated calculation of student's rating within the electronic portfolio. The study objective is to develop tools for collecting, storing and processing data on individual achievements of students and the implementation of the mathematical method of multicriteria optimization for ranking students on the basis of the portfolio data. Practical implications include development of a tool for an effective management of the educational process.
Materials and Methods. A prototype module of the university corporate system "ePortfolio" on the platform of 1C: Enterprise 8.3 is presented. To rank students, a special case of the alternative ranking method is implemented in the block of the data analysis module – pairwise comparison in order of their relative importance. At that, a unified scale of relations was used.
Research Results. The authors described the scheme of the information system (IS) operation "ePortfolio", presented a process interaction pattern for the portfolio formation, as well as a diagram of business processes under calculating an individual rating. A fragment of the sample is shown on which the performance of the multicriteria optimization block has been tested. The criteria of the calculations are described, as well as the rule of screening alternatives for solving for the optimum.



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: ponomarevala@bk.ru, ox-rom@yandex.ru, zabolotnikovavs@yandex.ru, ponomarevala@bk.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Обсуждение и заключение. В работе приведены результаты работы блока ИС по ранжированию списка студентов. Результаты расчетов совпадают с практическими данными.

Discussion and Conclusion. The paper presents the results of the IS block operation on ranking a list of students. The calculation results coincide with the practical data.

Ключевые слова: многокритериальное ранжирование, оптимизация, электронное портфолио, «1С: Предприятие 8.3».

Keywords: multicriteria ranking, optimization, ePortfolio, “1C: Enterprise 8.3”

Образец для цитирования: Автоматизация процесса многокритериального ранжирования студентов с помощью электронного портфолио Л. А. Пономарева [и др.] Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 382−388. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-382-388

For citation: L.A. Ponomareva, et al. Automation of multicriteria ranking of students using ePortfolio. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 382−388. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-382-388

Введение. Оценка эффективности учебного процесса — одна из важнейших характеристик деятельности вуза при расчете его рейтинга [1]. Для повышения конкурентоспособности образовательной организации (ОО) на рынке образовательных услуг необходим эффективный мониторинг и объективная оценка результатов учебного процесса по каждому студенту [2]. Зачастую данные хранятся разрозненно или в общих списках, что не дает персонифицированного представления для будущего работодателя.

Образовательные организации проводят множество мероприятий, в которых участвует большое количество студентов. Интересны также индивидуальные достижения вне стен вуза, например, волонтерская деятельность, благотворительность, работа в летних молодежных лагерях и т. д. Подобная информация редко собирается и хранится должным образом. На основании собранных сведений можно формировать рейтинг для каждого обучающегося. Ранжирование студентов является одним из приемов эффективного управления деятельностью ОО [3]. Согласно новым стандартам образования и в соответствии с федеральным законом ФЗ 273 «Об образовании в Российской Федерации» [4] необходим автоматизированный сбор, хранение и обработка данных. Одно из решений этой проблемы — электронное портфолио, которое также позволит осуществлять автоматическое ранжирование студентов.

Методы и инструментарий исследования. Авторами спроектирован и реализован на платформе «1С: Предприятие 8.3» модуль корпоративной системы «Электронное портфолио» (ЭП), который может работать и как самостоятельная информационная система [5]. ИС хранит информацию о достижениях студентов и на основании этой информации производит автоматическое упорядочивание студентов по убыванию. Для ранжирования студентов применен метод векторной оптимизации.

Постановка задачи: построить математическую модель, которая оперирует с множеством $F(X)$ — альтернативных решений (альтернатив) (где X — некоторое множество критериев), которые будут в дальнейшем расположены в порядке убывания предпочтения. Самое предпочтительное решение будет стоять первым, за ним менее предпочтительное и т. д. Степень предпочтения оцениваться величиной рассчитанного ранга для каждой альтернативы. Ранг рассчитывается из значений весов критериев, которые присвоены лицом, принимающем решение (ЛПР).

Пусть функция $F_i(X_j)$ образует вектор оценки альтернативных решений при выполнении условий:

$$i = \overline{1,m}\,;\, j = \overline{1,n},$$

где m — количество альтернатив в выборке; n — число критериев, участвующих в определении ранга студента. Пусть $F_1(X_1)$ — оценка решения X_1 по первому критерию; $F_2(X_1)$ — оценка решения X_1 по второму критерию и т. д.

Тогда вектор оценки для первого решения имеет вид:

$$F(X_1) = (F_1(X_1),\, F_2(X_1),\, F_m(X_1)).$$

Областью множества оценок альтернатив назовем некоторое множество оценок Y_D, которые принадлежат допустимой области D, которая определяется на основе данных, хранящихся в базе данных ЭП:

$$D = \langle C, F, X, G, P \rangle \text{ [6]},$$

где C — цель, которая заключается в ранжировании списка студентов в порядке убывания рассчитанного рейтинга на основе данных электронного портфолио; F — альтернативы, т. е. фамилии студентов, подлежащих упорядочиванию; X — критерии, т. е. данные о достижениях обучающихся, хранящиеся в электронном портфолио; P — предпочтения: $X_1 > X_n$. Это показатели, которые соответствуют учебному процессу и являются основой для сравнения альтернатив и для принятия решения; G — ограничения на область допустимых решений.

Альтернативу $F_i(X_j)$, у которой наибольшее количество исследуемых критериев принимают максимальное значение, можно найти из выражения:

$$X_j \in D;\ F_i(X_j) \in Y_D.$$

Тогда задачу упорядочивания (ранжирования) альтернатив $(F_i(X_j))$ на критериальном множестве D^m в порядке их убывания можно описать выражением:

$$Y_D = F_i(D) = \{Y \mid Y=F(X),\ X \in D^m\}.$$

Для решения поставленной задачи авторами применен частный случай метода ранжирования альтернатив — попарное сравнение по степени их относительной важности с использованием унифицированной шкалы отношений [7]. Для каждой функции $F(X)$ ЛПР определялась степень предпочтительности $\mu_{Fi}(X_j)$, $j = \overline{1,n}$ на основании оценки веса каждого критерия.

Результаты исследования. Автоматизация процесса многокритериального ранжирования студентов происходит в модуле информационной системы их электронного портфолио. Схема функционирования прототипа ИС электронного портфолио на основе разработанной конфигурации в «1С: Предприятие 8.3» [8] представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема функционирования электронного портфолио

Для формирования портфолио обучающегося предусмотрено:

- ввод данных;
- преобразование данных в электронный формат;
- хранение данных;
- предоставление отчетов, в том числе рассчитанные рейтинги студентов и упорядоченные списки по кафедрам, факультетам, ОО.

Процесс формирования портфолио представлен на рис. 2.

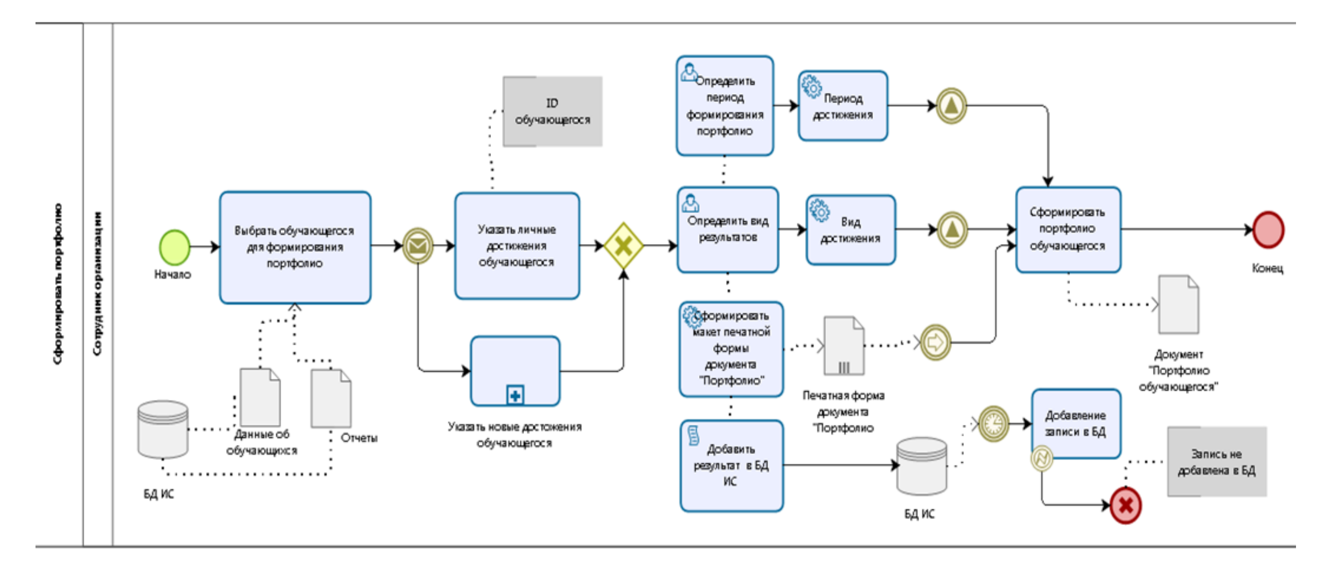


Рис. 2. Схема формирования портфолио

Спроектирована база данных для ИС электронного портфолио [9], трансформационная модель которой изображена на рис. 3.

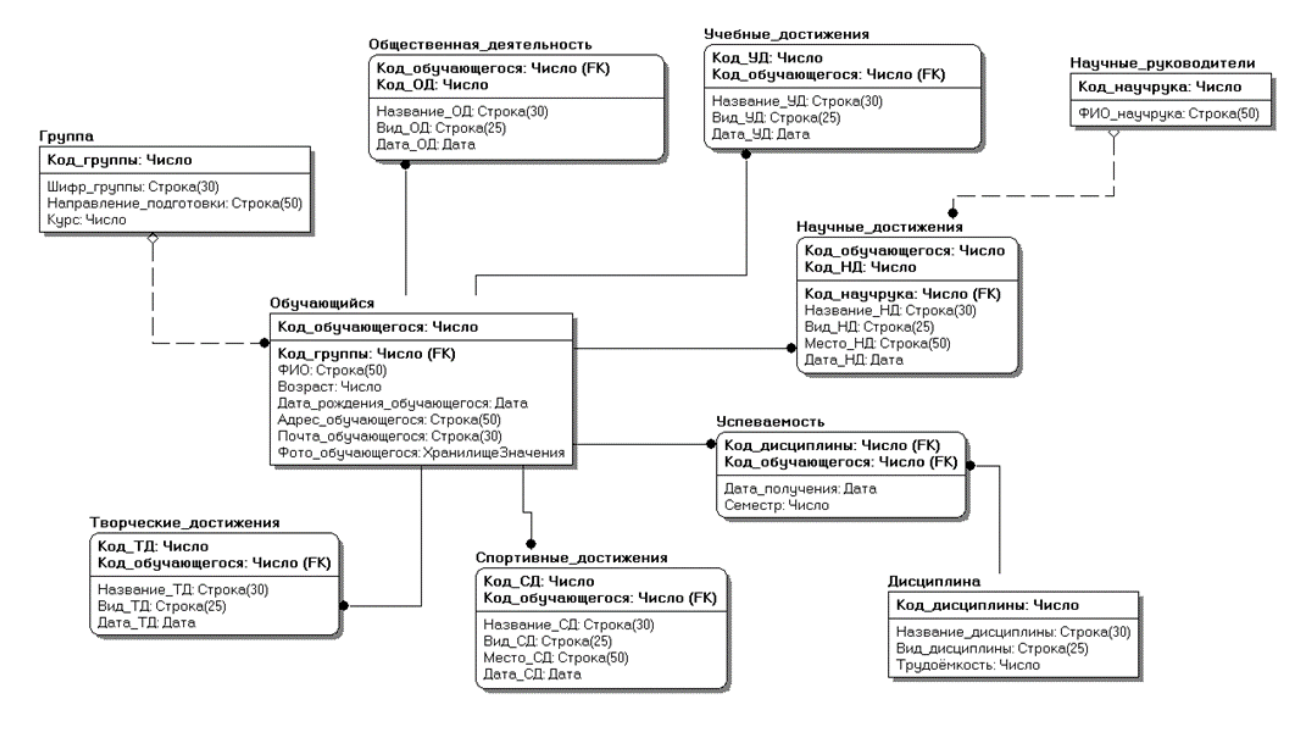


Рис. 3. Модель базы данных электронного портфолио

Взаимодействие информационных процессов по формированию индивидуального рейтинга обучающегося на основании информации, хранящейся в базе данных системы, продемонстрировано на рис. 4.

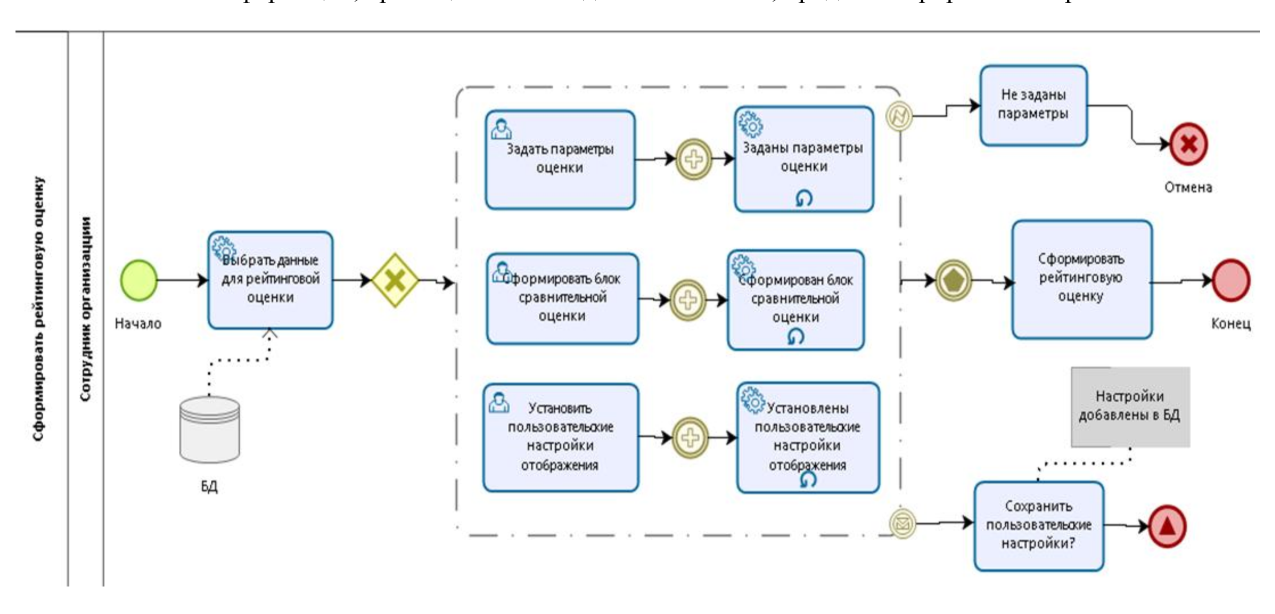


Рис. 4. Схема функционирования блока ИС по формированию рейтинговой оценки обучающегося

В ИС предусмотрено формирование различных отчетов [10]. Например, пользователь может отобразить блоки сравнительной оценки по учебным, спортивным, общественным, творческим и научным достижениям. Одна из форм отчёта представлена на рис. 5.

Портфолио обучающегося

ФИО:	**Аксаненко Светлана Владимировна**
Дата рождения:	**13.08.1994 0:00:00**
Пол:	**Женский**
Группа:	**МБ-151мз**
Адрес:	**Москва, ул.Гродненская д.12, кв.90**
Телефон	**8-(916)-123-34-44**
Почта:	**akssvet@gmail.com**

Учебные достижения:

Номер	Достижение	Вид	Рейтинг
1	Интеллектуальные игр	Конкурс	1

Научные достижения:

Номер	Достижение	Организация	Вид	Рейтинг
1	Конференция	ГАОУ ВО МГПУ	Конференция	1

Общественные достижения:

Номер	Достижение	Организация	Вид	Рейтинг
1	Донорство крови	ГАОУ ВО МГПУ	Донорство	1

Спортивные достижения:

Номер	Достижение	Уровень	Вид	Место	Рейтинг
1	Борьба	Институтский	Дзюдо	Лауреат	1

Творческие достижения:

Номер	Достижение	Вид	Место	Рейтинг
1	Интеллектуальная игр	Интеллектуальная игр	Первое	1
2	Турнир	Турнир по настольны	Третье	3

Рис. 5. Отчет в виде сформированного портфолио

Работу блока ИС, отвечающего за ранжирование студентов, проверяли на выборке из 1000 человек. К выборке было применено правило:

$$F_i(X) \geq F_i\,(X^*),\ i = \overline{1, m},$$
$$i_0\!:\ F_{i0}(X) > F_{i0}(X^*),$$

где $F_{i0}\ (X^*)$ — парето-оптимальное решение.

После возможных удалений, реализованных в соответствии с правилом, в таблице остались 250 взаимно несравнимых альтернатив, а из ранее сравнимых — только лучшие. Таким способом была сформирована выборка для дальнейших исследований, фрагмент которой представлен в таблице 1.

Таблица 1

Фрагмент выборки для ранжирования

№ п/п	ФИО	Участие в олимпиаде	Участие в спорт. Соревнов	Член профсоюза	Повышенная стипендия	Стипендия	Публикация научных статей	Участие в научных конференц	Волонтер	Донор	Благотворительность
1	КОЛОМОЙЦЕВА ГАЛИНА ЮРЬЕВНА	x	x		x	x		x			
2	МАРТЫНЕНКО ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА	x		x		x	x				
3	ЮРЧЕНКО ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА			x					x		x
4	КОНОВОДОВ ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ		x			x				x	x
5	АЛИЕВА АНТОНИНА ЛЕОНИДОВНА	x		x	x	x	x	x			
6	БАЙЦАР АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ	x							x		x
7	СМИРНОВА ЕЛЕНА ВАСИЛЬЕВНА			x		x		x			x

Оптимизация проводилась по 13-и критериям: участие в научных конференциях, наличие стипендии, участие в общественных организациях и т. д. Далее строилась матрица критериев, где каждому критерию приписывался вес в соответствии с предпочтениями ЛПР (таблица 2).

Таблица 2

Матрица весов критериев

Критерии		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	Ср. геом-е
Участник олим.	X1	1,00	0,14	3,00	0,25	2,00	1,00	1,00	3,00	0,25	2,00	5,00	5,00	3,00	1,2773764
Участ в спорт соревн	X2	7,00	1,00	8,00	1,00	5,00	5,00	2,00	5,00	0,33	9,00	7,00	7,00	7,00	3,5535071
Член профсоюза	X3	0,33	0,13	1,00	0,14	0,33	0,20	3,00	0,14	0,20	0,50	3,00	1,00	1,00	0,4675483
Повышенная стип.	X4	4,00	1,00	7,00	1,00	7,00	5,00	9,00	7,00	5,00	9,00	5,00	7,00	5,00	4,6581847
Стипендия	X5	0,50	0,20	3,00	0,14	1,00	0,33	0,33	0,33	0,14	0,20	3,00	0,14	1,00	0,434096
Публикация НС	X6	1,00	0,20	5,00	0,20	3,00	1,00	7,00	5,00	5,00	7,00	7,00	0,33	5,00	2,007042
Участие в науч. Конф.	X7	1,00	0,50	0,33	0,11	3,00	0,14	1,00	0,33	0,20	1,00	3,00	0,33	0,33	0,5143549
Волонтерство	X8	0,33	0,20	7,00	0,14	3,00	0,20	3,00	1,00	0,14	5,00	7,00	5,00	5,00	1,2315968
Донорство	X9	0,25	3,00	5,00	0,20	7,00	0,20	5,00	7,00	1,00	9,00	9,00	7,00	7,00	2,4958934
Благотворительность	X10	0,50	0,11	2,00	0,11	5,00	0,14	1,00	0,20	0,11	1,00	5,00	0,20	0,20	0,4581585
Летние лагеря	X11	0,20	0,14	0,33	0,20	0,33	0,14	0,33	0,14	0,11	0,20	1,00	1,00	0,25	0,259332
Творч конкурсы	X12	0,20	0,14	1,00	0,14	7,00	3,00	3,00	0,20	0,14	5,00	1,00	1,00	0,17	0,6757149
Учасник общ-ого движ.	к13	0,33	0,14	1,00	0,20	1,00	0,20	3,00	0,20	0,14	5,00	4,00	6,00	1,00	0,7389604
	Итого	16,65	6,91	43,67	3,84	44,67	16,56	38,67	29,55	12,78	53,90	60,00	41,01	35,95	18,77

В таблице 1 значок «×» заменяли на вес критерия. Далее проводили попарное сравнение студентов относительно какого-либо критерия, например, первого. Сравнение проводили следующим образом: наивысшее

преимущество одного студента перед другим — это значение веса первого критерия плюс единица. Единица нужна для того, чтобы при делении единицы на вес критерия не получалось большого числа. Это число должно быть меньше, чем максимальный вес критерия. Т. е. вес критерия — это максимальное значение в таблице (наивысший приоритет). На следующих шагах обработки данных система производит определенные расчеты [11]:

- находит количественную оценку противоречивости сравнений;
- вычисляет степень неточности сравнений;
- определяет общий критерий для каждой альтернативы;
- находит наилучшее решение;
- проверяет достоверность решения.

Обсуждение результатов. В результате работы блока прототипа ИС «Электронное портфолио», который отвечает за расчет рейтинговой оценки студента и упорядочивание предоставленного списка обучающихся по убыванию, можно получить отчет, который представлен в таблице 3.

Таблица 3

Фрагмент таблицы с результатами ранжирования студентов

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	Итоговые значения
	0,068048	0,189301	0,024907	0,248148	0,023125	0,106918	0,027400452	0,065609	0,132959973	0,024407	0,013815004	0,035996	0,039366	
F1	4,69	9,93	0	10,99	2,43	0	2,56	0	0	0	0	0	4,08	5,213001
F2	4,69	0	2,52	0	2,43	7,48	0	0	0	0	1,61	4,05	0	1,4058781
F3	0	0	2,52	0	0	0	0	6,14	0	3,16	0	0	4,08	0,7033417
F4	0	9,93	0	0	2,43	0	0	0	9,42	3,16	1,61	0	0	3,2877994
F5	4,69	0	2,52	10,99	2,43	7,48	2,56	0	0	0	0	4,05	0	4,1809328
F6	4,69	0	0	0		0	0	6,14	0	3,16	1,61	0	4,08	0,9819622
F7	0	0	2,52	0	2,43	0	2,56	0	0	3,16	0	4,05	0	0,412015
F8	4,69	9,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,1988993
F9	0	0	2,52	10,99	0	0	0	0	0	0	0	4,05	0	2,9357024
F10	0	9,93	0	10,99	0	7,48	0	6,14	0	0	1,61	0	4,08	5,9923473

В таблице F1–F10 — фамилии студентов; верхняя строка — названия критериев, по которым рассчитывался ранг каждого объекта; вторая строка сверху — вес критерия; другие числовые значения — количественные оценки студента за участие в той или иной деятельности. Наивысшее предпочтение ЛПР отдавалось критериям, которые были связаны с учебой (стипендия, повышенная стипендия, научная деятельность и т. д.). По результатам расчета видно, что первые четыре места займут студенты, которые получают повышенную стипендию. Самый высокий рейтинг у студента F10 — он получает повышенную стипендию, имеет научные публикации и является участником спортивных соревнований. ИС позволяет различные однотипные достижения (например, спортивный разряд, победитель или участник соревнований) объединять в один кластер и давать общую оценку кластеру (представлять в расчетах в качестве одного критерия с определенным весом).

Заключение. Авторы предлагают инструмент, который предоставляет пользователю возможность количественной оценки исследуемых объектов при большом объеме информации об этих объектах. Электронное портфолио позволяет максимально учитывать различные достижения студентов, и не только в стенах вуза, обеспечивает доступность данных для самих студентов, хранит большое количество информации об обучаемом. Расчет индивидуального рейтинга и ранжирование улучшает качество учебного процесса, что в результате повлияет на общий рейтинг вуза.

Библиографический список

1. Об образовании в Российской Федерации : федер. закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс. — Режим доступа : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (дата обращения : 20.09.2019).

2. Orlov, Y. Time-dependent sir modeling for d2d communications in indoor deployments / Y. Orlov, D. Zenyuk, A. Samuylov, D. Moltchanov, Y. Gaidamaka, K. Samouylov, S. Andreev, O. Romashkova // Proceedings - 31st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS. — 2017. — P. 726–731.

3. Gudkova, I. A. Determination of the range of the guaranteed radio communication in wireless telecommunication networks of IEEE 802.11 standard with the use of ping program / I. A. Gudkova, O. N. Romashkova, V. E. Samoylov // CEUR Workshop Proceedings 8. Ser. “ITTMM 2018”: Proceedings of the Selected Papers of the 8th International Conference "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems". — 2018. — P. 54–59.

4. Romashkova, O. N. Application of information technology for the analysis of the rating of university / O. N. Romashkova, L. A. Ponomareva, I. P. Vasilyuk, Y. V. Gaidamaka // Workshop proceedings 8. Ser. “ITTMM

2018”: Proceedings of the selected papers of the 8th international conference "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems". — 2018. — P. 46–53.

5. Ponomareva, L. A. Method of effective management of competence development processes in educational environments. / L. A. Ponomareva, P. E. Golosov, A. B. Mosyagin, V. I Gorelov //, Modern science: actual problems of theory and practice. Series: natural and technical. — 2017. — Vol. 9. — P. 48.

6. Ponomareva, L. A. Method of computer aided formation of organic compound descriptors for quantitative structure-property relationships / L. A. Ponomareva, M.I. Kumskov, E. A. Smolenskii, D. F. Mityushev, N. S. Zefirov // News of the Academy of Sciences. Chemical series. — 1994. — No. 8. — P. 1391.

7. Prokhorov, E. I. Fuzzy classification and fast rules for refusal in the QSAR problem / E. I. Prokhorov, L. A. Ponomareva, E.A. Permyakov, M.I. Kumskov // Pattern recognition and image analysis (advances in mathematical theory and applications). — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 542–544.

8. Пономарева, Л. А. Линейное ранжирование показателей оценки деятельности вуза / Л. А. Пономарева, О. Н. Ромашкова, И. П. Василюк // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2018. — Т. 14, № 1. — С. 245–255.

9. Пономарева, Л. А. Алгоритм оценки эффективности работы кафедр университета для управления его рейтинговыми показателями / Л. А. Пономарева, О. Н. Ромашкова, И. П. Василюк // Вестник Рязан. гос. радиотехн. ун-та. — 2018. — № 64. — С. 102–108.

10. Prokhorov, E. I. Fuzzy classification and fast rejection rules in the structure-property problem. / E. I. Prokhorov, L. A. Ponomareva, E. A. Permyakov, M. I. Kumskov // Pattern recognition and image analysis (advances in mathematical theory and applications). — 2013. — Vol. 23, no. 1. — P. 130–138.

11. Bobrikova, E. The application of a fluid-based model for the analysis of the distribution time of a file among users in peer-to-peer network. / E. Bobrikova, Y. Gaidamaka, O. Romashkova // Selected Papers of the II International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies" (Convergent 2017). CEUR Workshop Proceedings. — 2017 — Vol. 2064. — P. 55–61 Available at: http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper06.pdf

Сдана в редакцию 01.09.2019
Принята к публикации 11.11.2019

Об авторах:

Пономарева Людмила Алексеевна,
доцент кафедры «Прикладная информатика» Московского городского университета Института цифрового образования (Россия, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, д.4, кор. 1), кандидат физико-математических наук,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-6708-2755
ponomarevala@bk.ru

Ромашкова Оксана Николаевна,
профессор кафедры «Прикладная информатика» Московского городского университета Института цифрового образования (Россия, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, д.4, кор. 1), доктор технических наук,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1646-8527
ox-rom@yandex.ru.

Заболотникова Виктория Сергеевна,
доцент кафедры «Прикладная информатика» Московского городского университета Института цифрового образования (Россия, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, д.4, кор. 1), кандидат технических наук,
ORCID:http://orcid.org/0000-0001-7111-656X
zabolotnikovavs@yandex.ru

Белякова Анна Николаевна,
магистрантка кафедры «Прикладная информатика» Московского городского университета Института цифрового образования (Россия, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, д.4, кор. 1),
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-6708-2755
ponomarevala@bk.ru

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 389–397. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 389–397. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 681.3.681.5 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-389-397

Повышение эффективности работы генетического алгоритма в процессе решения задачи покрытия множеств*

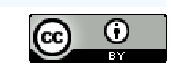
И. С. Коновалов[1], В. А. Фатхи[2], В. Г. Кобак[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Genetic algorithm efficiency improvement in the course of set cover problem solution***

I. S. Konovalov[1], V. A. Fatkhi[2], V. G. Kobak[3]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Практические задачи (размещение пунктов обслуживания, создание микросхем, составление расписаний и пр.) зачастую требуют точного или приближенного к точному решения при большой размерности. Достижение приемлемого результата в данном случае требует решения задачи покрытия множеств — фундаментальной для комбинаторики и теории множеств. Точное решение можно получить с помощью переборных методов, однако в этом случае при повышении размерности задачи во много раз возрастает время работы точного алгоритма. По этой причине следует увеличивать точность приближенных методов: они дают решение, лишь приближенное к точному, однако затрачивают на поиск ответа намного меньше времени при большой размерности.
Материалы и методы. Описывается один из способов решения задачи покрытия — генетический алгоритм. Авторы используют модификацию модели Голдберга и пытаются повысить ее эффективность с помощью различных видов оператора мутации и скрещивания. Речь идет о генной мутации, двухточечной мутации, мутации добавления и удаления, мутации вставки и удаления, сальтации, мутациях на основе инверсии. Отмечены следующие виды оператора скрещивания: одноточечный, двухточечный, трехточечный и их версии с ограничениями, равномерный, триадный. Исследуется влияние условия останова и значений вероятностей генетических операторов на точность получаемых решений. Показано, каким образом увеличение числа особей в поколении влияет на эффективность решения.
Результаты исследования. Итоги экспериментов позволяют сделать три вывода.
1) Рекомендуется использовать сочетание генной мутации и одноточечного скрещивания.
2) При повышении количества особей растет точность результата и время его получения. Среднее отклонение от точного результата при размере задачи 25×25 составило 0 %, при 50×50 — 0%, при 75×75 — 0,013 %, при 100×100 — 0 %, при 110×110 — 0 % (количество особей — 500).

Introduction. Practical tasks (location of service points, creation of microcircuits, scheduling, etc.) often require an exact or approximate to exact solution at a large dimension. In this case, achieving an acceptable result requires solving a set cover problem, fundamental for combinatorics and the set theory. An exact solution can be obtained using exhaustive methods; but in this case, when the dimension of the problem is increased, the time taken by an exact algorithm rises exponentially. For this reason, the precision of approximate methods should be increased: they give a solution that is only approximate to the exact one, but they take much less time to search for an answer at a large dimension.
Materials and Methods. One of the ways to solve the covering problem is described, it is a genetic algorithm. The authors use a modification of the Goldberg model and try to increase its efficiency through various types of mutation and crossover operators. We are talking about gene mutations, two-point mutations, addition and deletion mutations, insertion and deletion mutations, saltation, mutations based on inversion. The following types of crossover operator are noted: single-point, two-point, three-point and their versions with restrictions, uniform, triad. The effect of the stopping condition and the probability values of genetic operators on the accuracy of the solutions is investigated. It is shown how an increase in the number of individuals in a generation affects the efficiency of a solution.
Research Results. The experiment results allow us to draw three conclusions.
1) It is recommended to use a combination of gene mutation and single-point crossing.
2) With an increase in the number of individuals, the accuracy of the result and the time to obtain it increases. The average deviation from the exact result at a task size of 25 × 25 was 0%, at 50 × 50 – 0%, at 75 × 75 – 0.013%, at 100 × 100 – 0%, at 110 × 110 – 0% (the number of individuals was 500).



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: xigorx92@mail.ru, fatkhi@mail.ru, valera33305@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

3) Целесообразно использовать вероятности оператора мутации и скрещивания 100 % и 100 % соответственно.
Обсуждение и заключения. Даны рекомендации, позволяющие повысить эффективность решения задачи покрытия. С этой целью указано предпочтительное сочетание параметров генетического алгоритма, типов операторов скрещивания и мутации

3) It is advisable to use the probabilities of the mutation and crossover operator 100% and 100%, respectively.
Discussion and Conclusions. Recommendations are given to improve the efficiency of covering problem solution. To this end, a preferred combination of the genetic algorithm parameters, of types of crossover and mutation operators is indicated.

Ключевые слова: генетический алгоритм, задача покрытия множеств, модель Голдберга, условие останова, скрещивание, мутация.

Keywords: genetic algorithm, set cover problem, Goldberg model, stopping condition, crossing, mutation.

Образец для цитирования: Коновалов, И. С. Повышение эффективности работы генетического алгоритма в процессе решения задачи покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 389−397. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-389-397

For citation: I.S. Konovalov, et al. Genetic algorithm efficiency improvement in the course of set cover problem solution. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 389−397. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-389-397

Введение. Многие практические задачи требуют точного или приближенного к точному решения при большой размерности. Среди таких задач: размещение пунктов обслуживания, создание микросхем, составление расписаний. Достижение приемлемого результата в данном случае требует решения задачи покрытия множеств — фундаментальной для комбинаторики и теории множеств. Точное решение можно получить с помощью переборных методов (например, метода ветвей и границ). Естественно, при повышении размерности задачи во много раз возрастает время работы точного алгоритма. По этой причине следует увеличивать точность приближенных методов: они дают решение, лишь приближенное к точному, однако затрачивают на поиск ответа намного меньше времени при большой размерности.

Наглядным примером может служить также следующая практическая задача. Допустим, необходимо собрать команду специалистов для корабля. Члены экипажа должны обладать в совокупности всеми требуемыми навыками, но количество сотрудников должно быть минимальным. Это невзвешенная задача покрытия, то есть «весы» членов группы одинаковы и поэтому не важны. Если же каждому члену команды поставить в соответствие какую-то величину — вес (например, опыт работы), то задача станет взвешенной. Актуальной практической проблемой является решение данной задачи за более короткое время, которое позволяет получить результат, как можно более приближенный к точному.

Материалы и методы

Постановка задачи. Дано множество U из n элементов и совокупность подмножеств U, $S = \{S_1,\ldots, S_k\}$. Каждому подмножеству S_i сопоставлена некоторая неотрицательная стоимость c: $S \to Q^+$. $S' \subseteq S$ является покрытием, если любой элемент из U принадлежит хотя бы одному элементу из S' [1, 2].

Задача может быть представлена в двух вариантах: взвешенном и невзвешенном. Взвешенная задача о покрытии предполагает поиск совокупности подмножеств, которая покрывает все множество U и имеет минимальный вес. В невзвешенном варианте итоговая совокупность должна иметь минимально возможное количество подмножеств.

Методы решения задачи. Генетический алгоритм. Задачи покрытия решаются с помощью эвристических методов, приближенных алгоритмов с априорной оценкой, точных алгоритмов [3, 4].

Точные алгоритмы (самый известный из них — метод ветвей и границ) дают точное решение, но в задачах большой размерности бесполезны, т. к. затрачивают слишком много времени. Если точностью решения можно до известной степени пренебречь, рекомендуется использовать приближенные алгоритмы [5], которые решают задачу за приемлемое время. Речь идет об алгоритмах с априорной оценкой (например, жадный алгоритм [6]) и вероятностных эвристиках (метод муравьиных колоний [7, 8], нейронные сети, эволюционные вычисления).

В данной статье рассматриваются генетические алгоритмы (ГА) и способы повышения их эффективности. В 1975 году Джон Холланд предложил ГА вероятностного характера, основанные на правилах естественного отбора и наследования. Свойства ГА исследуются в [10, 11]. Подробное описание применимости генетического алгоритма для решения задачи покрытия приводится в [1]. Способы применения ГА для данной задачи описаны в [12, 13].

Авторы представленного исследования применяют модель Голдберга [14], которая модифицирована следующим образом: использованы различные виды оператора мутации и скрещивания, обеспечена защита от появления «неправильных» покрытий в процессе изменения особей.

Опишем основные параметры данного алгоритма. В отношении особи используется бинарное кодирование («0», «1»). Оценочную функцию можно выразить следующей формулой:

$$\sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \min,$$

где x^k — n-мерный вектор, у которого j-й элемент x^k_j равен 1, если подмножество Sj является составной частью покрытия, и равен 0 в ином случае; c_j — стоимость подмножества S_j.

Условие останова алгоритма — количество поколений неизменности решения.

В модели Голдберга применен турнирный отбор особей. Авторы используют равновероятный случайный — выбор двух особей поколения для применения к ним оператора скрещивания и (или) мутации.

В [15] описана модификация данного алгоритма с помощью стратегии формирования элитных особей.

Обзор видов оператора скрещивания. При скрещивании двух особей потомки приобретают часть генов от каждого из родителей, и тем самым расширяется пространство поиска. В классическом варианте ГА используется одноточечный кроссовер. Ученые, занимающиеся генетическими алгоритмами, предлагают свои разновидности данного оператора [16, 17]. Как говорилось ранее, авторы предложили бинарное кодирование особи, а не вещественное, поэтому из всех разновидностей можно использовать только некоторый круг. Скрещивание особей с вещественными генами описывается в [16]. Приведем обзор разновидностей кроссовера, подходящих для использования в данном ГА.

Одноточечный кроссовер (рис. 1). Выбираются две особи для скрещивания.



Рис. 1. Одноточечный кроссовер

Случайным образом разыгрывается точка скрещивания. В потомок 1 копируется часть генов родителя 1 до точки скрещивания, а часть генов родителя 2 — после точки скрещивания. Потомок 2 создается аналогичным образом, но наоборот.

Двухточечный кроссовер (рис. 2). Выбираются две особи для скрещивания.



Рис. 2. Двухточечный кроссовер

Случайным образом разыгрываются две разные точки скрещивания. В потомок 1 копируется часть генов родителя 1 до точки скрещивания 1, часть генов родителя 2 между точками скрещивания и часть генов родителя 1 после точки скрещивания 2. Потомок 2 создается аналогичным образом, но наоборот.

Аналогично работает многоточечный кроссовер и его частный случай — трехточечный. Описанные операторы можно модифицировать, а именно: дополнительно проверить, чтобы точки скрещивания выбирались

только в тех местах, где гены особей родителей имеют разное значение. Таким образом появились ограниченные одноточечный, двухточечный и трехточечный кроссоверы.

Равномерный кроссовер [16] (рис. 3). Случайно генерируется маска — двоичная особь. При этом часть генов потомка переходит от одного родителя, часть — от другого.

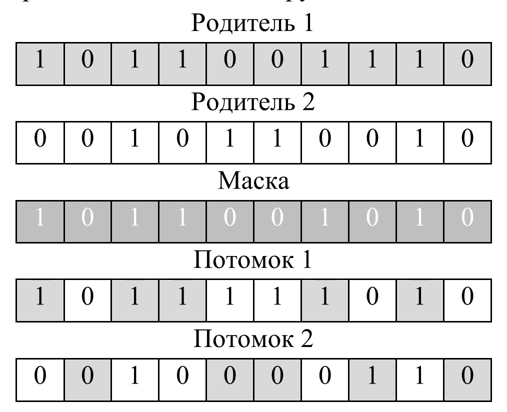


Рис. 3. Равномерный кроссовер

Далее маска анализируется. Если в ней «1», то соответствующий ген родителя 1 переходит в соответствующее место потомка 1. Если иначе, то потомок 1 принимает ген родителя 2.

Потомок 2 генерируется обратным путем. Ген заимствуется от родителя 1, если на том же месте в маске располагается «0». Если иначе, то потомок 1 принимает ген родителя 2.

Похожая идея используется в работе *триадного кроссовера* [16]. Отличие в том, что в качестве маски используется особь из поколения, выбранная случайным образом. Затем 10 % генов маски подвергаются мутации. Далее: если ген родителя 1 совпадает с геном маски, то этот ген переходит потомку 1, иначе ген переходит от родителя 2. У потомка 2 на тех местах, где потомок 1 принял гены родителя 1, находятся гены родителя 2, и наоборот.

Обзор видов оператора бинарной мутации. Какова роль мутации в эволюционном процессе? Если использовать только оператор скрещивания, в итоге будет прекращено появление новых особей. Чтобы качественно изменить особь, нужно применить оператор мутации, который помогает увеличивать генетическое разнообразие.

В классическом ГА используется *одноточечный* оператор мутации (рис. 4): в особи случайным образом выбирается точка мутации — ген, который далее меняется своим значением с соседним геном.



Рис. 4. Одноточечный оператор мутации

Кроме этой мутации рассмотрено еще несколько видов.

Двухточечный оператор мутации (рис. 5) — модификация одноточечного: случайно выбираются два гена, и они обмениваются своими значениями.



Рис. 5. Двухточечный оператор мутации

Генная мутация (рис. 6) основана на том, что инвертируется значение одного случайно выбранного гена.



Рис. 6. Генная мутация

Мутация добавления и удаления [16] (рис. 7) получается в результате совмещения двух операций: добавления случайного гена в конец хромосомы и удаления случайного гена из полученной хромосомы.



Рис. 7. Мутация добавления и удаления

Мутация вставки и удаления [16] похожа на мутацию добавления и удаления: случайный ген добавляется в случайную позицию хромосомы и случайный ген удаляется из полученной хромосомы.

Мутация на основе плотности мутации [16]. Каждый ген особи мутирует с определенной вероятностью. Вероятность мутирования гена обычно выбирается так, чтобы изменению подверглись от 1 % до 10 % генов.

Сальтация [17] (рис. 8) — мутация на основе инверсии *k* генов особи.

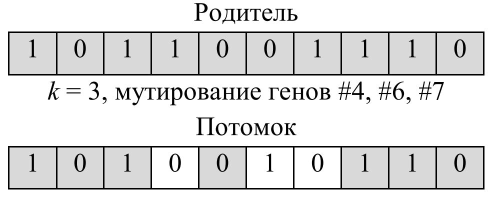


Рис. 8. Сальтация

Инверсия [17] (рис. 9) — мутация генов между двумя точками разрыва, выбранными случайным образом.



Рис. 9. Инверсия

Транслокация [17] (рис. 10) — мутация генов, которые попали в два случайно выбранных участка особи.



Рис. 10. Транслокация

Дополнение [17] — мутация, при которой особь потомка формируется путем инвертирования каждого гена особи родителя.

Результаты исследования

Анализ производительности генетического алгоритма с использованием различных сочетаний «мутация + скрещивание». Какие комбинации видов бинарной мутации и скрещивания более выгодно использовать для увеличения эффективности ГА? Авторы спроектировали программное средство с использовани-

ем языка C Sharp для сравнения генетических алгоритмов по оптимальности решений и затрат времени. Для экспериментов использовался персональный компьютер с операционной системой Microsoft Windows 10 Pro ×64, процессором Intel(R) Core(TM) i5-2500KCPU 3.30GHz, оперативной памятью 6 Гб.

Выполнено по 100 опытов с матрицами размером $n \times m$, где n — число подмножеств множества U, m — число элементов множества U. Матрицы формируются случайным образом. При этом соблюдаются перечисленные ниже условия.

— Коэффициент заполненности матрицы подмножеств единицами $p = 0{,}5$.
— Случайным образом генерируются веса подмножеств из интервала от 1 до 200.
— Число подмножеств = 100, мощность множества $U = 100$.

Для ГА использованы перечисленные ниже параметры.

— Количество поколений = 50.
— Вероятность кроссовера = 1.
— Вероятность мутации = 1.
— Условие останова =100 поколений.
— Оператор кроссовера:
  - Скр1 — одноточечный;
  - Скр2 — ограниченный одноточечный;
  - Скр3 — двухточечный;
  - Скр4 — ограниченный двухточечный;
  - Скр5 — трехточечный;
  - Скр6 — ограниченный трехточечный;
  - Скр7 — равномерный;
  - Скр8 — триадный.

— Оператор мутации:
  - Мут1 — генная;
  - Мут2 — одноточечная;
  - Мут3 — двухточечная;
  - Мут4 — мутация добавления и удаления;
  - Мут5 — мутация вставки и удаления;
  - Мут6 — сальтация;
  - Мут7 — дополнение;
  - Мут8 — инверсия;
  - Мут9 — транслокация.

В табл. 1 показаны средние значения результатов сравнения алгоритмов по весам покрытий, а в табл. 2 — по времени работы. Также в табл. 1 и 2 вошли результаты работы генетического алгоритма с 50 особями, предложенного Нгуен Минь Хангом в [13].

Таблица 1

Сравнение эффективности видов оператора скрещивания и мутации по весам покрытий

Алгоритм 100×100 50 особей	Мут1	Мут2	Мут3	Мут4	Мут5	Мут6	Мут7	Мут8	Мут9	ГА Нгуен Минь Ханга
Скр1	41,78	60,35	45,02	60,12	55,07	67,46	67,46	67,46	67,46	46,23
Скр2	42,29	58,23	44,87	59,37	51,83	67,46	67,46	67,46	67,46	
Скр3	42,53	58,75	45,38	61,35	55,93	67,41	67,46	67,72	67,46	
Скр4	42,91	63,63	45,75	63,38	57,64	67,46	67,46	67,46	67,46	
Скр5	42,41	60,58	45,18	63,11	54,92	67,46	68,52	67,46	67,46	
Скр6	42,71	65,96	46,37	65,38	58,2	67,46	67,46	67,46	67,32	
Скр7	41,74	50,61	45,52	53,75	48,31	67,46	67,46	67,29	67,46	
Скр8	43,39	57,84	45,3	60,37	54,07	67,46	67,46	67,46	67,46	

Таблица 2

Сравнение эффективности видов оператора скрещивания и мутации по временным затратам (мс)

Алгоритм 100×100 50 особей	Мут1	Мут2	Мут3	Мут4	Мут5	Мут6	Мут7	Мут8	Мут9	ГА Нгуен Минь Ханга
Скр1	2418	1363	2028	1996	1777	1569	2251	1746	1853	1900
Скр2	2365	1399	1974	2175	1817	1571	2257	1756	1855	
Скр3	2485	1417	2111	2008	1824	1627	2325	1841	1935	
Скр4	2568	1416	2126	2145	1884	1626	2304	1809	1909	
Скр5	2537	1406	2131	1862	1825	1631	2338	1834	1927	
Скр6	2509	1422	2139	1902	1822	1636	2315	1820	1903	
Скр7	2679	1569	1970	2220	2124	1697	2410	1905	2008	
Скр8	2484	1443	2084	1950	1910	1654	2353	1866	1942	

Исходя из данных результатов, для повышения эффективности работы ГА рекомендуется использовать комбинации «равномерное скрещивание + генная мутация» и «одноточечное скрещивание + генная мутация».

Влияние вероятности мутации и кроссовера на эффективность генетического алгоритма. Для исследования указанной проблемы применено описанное выше программное средство. Рассмотрена комбинация «генная мутация + равномерное скрещивание» как самая эффективная (наравне с «генная мутация + одноточечное скрещивание»). Размерность задачи 100×100, 50 особей. Результаты приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Сравнение эффективности вероятностей оператора скрещивания и мутации по весам покрытий

Скрещивание \ Мутация	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,2	60,31	59,45	59,37	54,65	44,35
0,4	58,2	58,09	57,51	54,71	45,01
0,6	57,98	57,58	54,67	52,67	44,75
0,8	54,03	55,18	55,07	51,11	44,68
1	52,17	50,95	50,28	48,89	44,33

Таблица 4

Сравнение эффективности вероятностей оператора скрещивания и мутации по временным затратам (мс)

Скрещивание \ Мутация	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,2	992	1038	1121	1293	2047
0,4	1038	1101	1196	1418	2115
0,6	1111	1205	1325	1504	2273
0,8	1237	1314	1420	1656	2338
1	1338	1448	1602	1858	2594

Выявлено наилучшее сочетание: вероятность мутации 100 % и вероятность скрещивания 100 %.

Влияние размерности поколения на эффективность ГА. В табл. 5 и 6 приведены результаты с 50, 100, 200, 500, 1000 особями и размерностью задачи 100×100 (ГА1 — одноточечное скрещивание + генная мутация, ГА2 — равномерное скрещивание + генная мутация, ГА3 — ГА Нгуен Минь Хангом).

Таблица 5

Влияние размерности поколения на веса покрытий, получаемые генетическим алгоритмом

Особи	ГА1	ГА2	ГА3
50	43,76	43,68	49,53
100	42,88	42,8	47,12
200	42,7	42,61	46,87
500	42,67	42,61	47,64
1000	42,61	42,61	50,35

Таблица 6

Влияние размерности поколения на временные затраты, необходимые для реализации генетического алгоритма (мс)

Особи	ГА1	ГА2	ГА3
50	2229	2377	1842
100	4175	4791	2219
200	8185	8722	2611
500	19109	20992	8440
1000	37588	41855	14581

Естественно, с увеличением размера поколения увеличивается время работы ГА, и при этом повышается точность решения задачи.

Влияние условия останова на эффективность решения задачи. В рамках представленной работы в качестве условия останова используется число поколений неизменности лучшего решения. В табл. 7 и 8 показаны результаты сравнительного анализа ГА из прошлого эксперимента с условием останова 100, 200, 300, 500.

Таблица 7

Влияние условия останова на веса покрытий, получаемые генетическим алгоритмом

Условие останова	ГА1	ГА2	ГА3
100	49,96	50,28	56,74
200	49,23	48,79	56,29
300	50,14	48,5	57,2
500	49,82	49,66	57,17

Таблица 8

Влияние условия останова на временные затраты, необходимые для реализации генетического алгоритма (мс)

Условие останова	ГА1	ГА2	ГА3
100	2264	2517	1834
200	3840	4251	3479
300	4994	5955	5001
500	7892	8429	8370

С увеличением условия останова увеличивается время работы алгоритма. Это целесообразно при условии останова 200–250 особей.

Обсуждение и заключение. Авторы данной работы предприняли попытку повысить эффективность ГА применительно к задаче покрытия множеств. С этой целью использованы различные виды оператора мутации, скрещивания и параметризации ГА. Исследовано влияние вероятностей генетических операторов на эффективность решения задачи, выбор условия останова и количества особей. Выявлены границы целесообразного использования ГА и метода ветвей и границ. По итогам проведенного исследования можно сделать ряд выводов.

1) Рекомендуется использовать сочетание генной мутации и одноточечного скрещивания.

2) Если повышается число особей, то растет точность результата и время его получения. Среднее отклонение от точного результата при размерности задачи 25×25 составило 0 %, 50×50 — 0 %, 75×75 — 0,013 %, 100×100 — 0 %, 110×110 — 0 % при 500 особях.

3) Эффективно использование вероятности оператора мутации и скрещивания 100 % и 100 % соответственно.

Библиографический список

1. Коновалов, И. С. Применение генетического алгоритма для решения задачи покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2016. — № 3. — С. 125–132.

2. Коновалов, И. С. Сравнительный анализ работы жадного алгоритма Хватала и модифицированной модели Голдберга при решении взвешенной задачи нахождения минимального покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Тр. СКФ МТУСИ. Часть I. — Ростов-на-Дону : СКФ МТУСИ, 2015. — С. 366–371

3. Еремеев, А. В. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования / А. В. Еремеев, Л. А. Заозерская, А. А. Колоколов // Дискретный анализ и исследование операций. — 2000. — Т. 7, № 2. — С. 22–46.

4. Есипов, Б. А. Исследование алгоритмов решения обобщенной задачи о минимальном покрытии / Б. А. Есипов, В. В. Муравьев // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2014. — № 4 (2). — С. 308–312.

5. Кононов, А. В. Приближенные алгоритмы для NP-трудных задач / А. В. Кононов, П. А. Кононова ; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : РИЦ НГУ, 2014. — 117 с.

6. Chvatal, V. A greedy heuristic for the set-covering problem / V. Chvatal // Mathematics of Operations Research. — 1979. — Vol. 4, № 3. — P. 233–235.

7. Лебедев, О. Б. Покрытие методом муравьиной колонии / О. Б. Лебедев // КИИ-2010. Двенадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием : тр. Т. 2. — Москва : Физматлит, 2010. — С. 423–431.

8. Лебедев, Б. К. Покрытие на основе метода роя частиц / Б. К. Лебедев, В. Б. Лебедев // Нейроинформатика-2011 : сб. науч. тр. XIII Всерос. науч.-техн. конф. Ч. 2. — Москва : Физматлит, 2011. — С. 93–103.

9. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J. H. Holland. — Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975. — P. 245.

10. Становов, В. В. Исследование эффективности различных методов самонастройки генетического алгоритма / В. В. Становов, Е. С. Семенкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2012. — № 8. — С. 319–320.

11. Коромыслова, А. А. Исследование свойства масштабируемости генетического алгоритма / А. А. Коромыслова, Е. С. Семенкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2012. — № 8. — С. 305–306.

12. Еремеев, А. В. Генетический алгоритм для задачи о покрытии / А. В. Еремеев // Дискретный анализ и исследование операций. — 2000. — Т. 7, № 1. — С. 47–60.

13. Нгуен Минь Ханг. Применение генетического алгоритма для задачи нахождения покрытия множества / Нгуен Минь Ханг // Динамика неоднородных систем. — Москва : ЛКИ, 2008. — Т. 33, вып. 12. — С. 206–219.

14. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning / D. E. Goldberg. — Reading : Addison-Wesley, 1989. — P. 432.

15. Коновалов, И. С. Стратегия элитизма модифицированной модели Голдберга генетического алгоритма при решении задачи покрытия множеств / И. С. Коновалов, В. А. Фатхи, В. Г. Кобак // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2016. — № 4. — С. 50–56.

16. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко // Астрахань : Астраханский университет, 2007. — 88 с.

17. Батищев, Д. И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д. И. Батищев. — Воронеж : ВГТУ, 1995. — 69 с.

Сдана в редакцию 20.09.2019
Принята к публикации 20.11.2019

Об авторах:

Коновалов Игорь Сергеевич,
аспирант Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6296-3660
xigorx92@mail.ru

Фатхи Владимир Ахатович,
заведующий кафедрой «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0373-7126
fatkhi@mail.ru

Кобак Валерий Григорьевич,
доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1001-0574
valera33305@mail.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 05.13.18 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-398-406

Методы имитационного математического моделирования российского срочного рынка на современном этапе*

Т. А. Карпинская[1], О. Е. Кудрявцев[2]**
[1]Российская таможенная академия, Люберцы, Российская Федерация
[2]Ростовский филиал Российской таможенной академии, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Methods of simulation mathematical modeling of the Russian derivatives market in modern times***

T.A. Karpinskaya[1], O.E. Kudryavtsev[2]**
[1]Russian Customs Academy, Lyubertsy, Russian Federation
[2]Russian Customs Academy, Rostov Branch, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Работа посвящена имитационному моделированию. Описаны основные методы имитационного математического моделирования на срочном рынке. Рассмотрена группа реалистичных негауссовских процессов Леви, которые обобщают классическую модель Блэка-Шоулса. Целью работы явилось исследование наиболее эффективных методов прогнозирования рынка, а также программная реализация метода имитационного математического моделирования российского срочного рынка, основанного на модели Леви. Данное исследование актуально в связи со спросом на приложения, позволяющие симулировать динамику финансовых активов и оценивать опционы в реалистичных моделях срочного рынка, допускающих скачки.
Материалы и методы. Рассмотрены основные методы прогнозирования срочного рынка, способы определения уровня волатильности при известной цене опциона. Выделены наиболее эффективные виды процессов Леви для имитационного математического моделирования российского срочного рынка на современном этапе. Рассмотрены возможности языка *Java* для реализации математических методов.
Результаты исследования. Разработана программа на языке *Java*, реализующая математическую модель Леви, включающую в себя гауссовский и обобщённый пуассоновский процессы. Программа для реализации математического метода создана в свободной интегрированной среде разработки приложений *NetBeans IDE* для работы с любой операционной системой.
Обсуждение и заключения. В результате анализа имитационного математического моделирования на срочном рынке наиболее эффективными являются методы, основанные на реалистичных негауссовских процессах Леви. Программная реализация таких математических методов может использоваться в учебных целях. Разработанное приложение показало высокое качество и скорость расчётов с помощью программных ресурсов.

Introduction. The paper is devoted to simulation modeling. Basic methods of the simulation mathematical modeling in the derivatives market are described. A group of realistic non-Gaussian Levy processes that generalize the classical Black-Scholes model is considered. The work objective is to study the most efficient methods of market forecasting, as well as the software implementation of the simulation mathematical modeling technique of the Russian derivatives market based on the Levy model. This research is relevant due to the demand for applications that simulate the dynamics of financial assets and evaluate options in realistic models of the derivatives market, allowing for jumps.
Materials and Methods. Basic methods for forecasting the derivatives market, methods for determining the volatility rate at a known option price, are considered. The most effective types of Levy processes for the simulation mathematical modeling of the Russian derivatives market at the present stage are highlighted. The possibilities of the Java language for the implementation of mathematical methods are considered.
Research Results. A program is developed in the Java programming language that implements the Levy mathematical model, which includes Gaussian and generalized Poisson processes. The program for calculating the mathematical method is created in the free integrated application development environment NetBeans IDE to work with any operating system.
Discussion and Conclusions. The result of the simulation mathematical modeling analysis has shown that the most efficient methods in the derivatives market are those based on realistic non-Gaussian Levy processes. The software implementation of such mathematical methods can be used for educational purposes. The developed application has demonstrated high quality and speed of calculations using software resources.



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: Karpinski-2@mail.ru, okudr@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: математическое моделирование, численный метод, индекс волатильности, опцион, процесс Леви, классическая модель Блэка-Шоулса, срочный рынок, гауссовский процесс, обобщённый пуассоновский процесс.

Keywords: mathematical modeling, numerical method, volatility index, option, Levy process, classical Black-Scholes model, derivatives market, Gaussian process, generalized Poisson process.

Образец для цитирования: Карпинская, Т. А Методы имитационного математического моделирования российского срочного рынка на современном этапе / Т. А. Карпинская, О. Е. Кудрявцев // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 398 − 406. https://doi.org /10.23947/1992-5980-2019-19-4-398-406

For citation: T. A. Karpinskaya, et al. Methods of simulation mathematical modeling of the Russian derivatives market in modern times. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 398 − 406. https://doi.org /10.23947/1992-5980-2019-19-4-398-406

Введение. Современная рыночная экономика не способна существовать без эффективной работы финансового рынка. Здесь особое место занимает рынок срочных финансовых инструментов, позволяющий хеджировать риски нежелательного скачкообразного изменения цен на фондовом или валютном рынках. Российский срочный рынок активно развивается, привлекая все больше инвесторов. В этой связи растет спрос на программные средства, позволяющие симулировать динамику финансовых активов и оценивать опционы в реалистичных моделях, допускающих скачки в ценах.

Явным или неявным образом, обрабатывая входящую информацию, каждый из участников рынка может прогнозировать будущие движения цен. То есть торговая система — это алгоритм преобразования различной информации в прогноз с определенными уровнями доверия. Системный трейдер поручает прогнозирование алгоритму, дискреционный/интуитивный трейдер использует свой опыт/интуицию. Из-за того, что любой прогноз имеет вероятностную природу, часть прогнозов не сбывается. Хороший прогноз должен быть обоснованным с точки зрения статистики, быть репрезентативным и должен использовать некие вероятности, закономерности, причинно-следственные связи. Идея, лежащая в основе прогноза должна быть рациональна и объяснима.

Адекватное моделирование срочного рынка позволяет участникам извлекать прибыль. Таким образом, исследование методов имитационного математического моделирования российского срочного рынка является актуальным, поскольку позволяет решать задачу определения адекватной стоимости срочного контракта. Новизна работы заключается в программной реализации имитационного моделирования вычисления цен опционов в модели Мертона на языке *Java*. В настоящее время особый интерес представляют приложения с *web*-интерфейсом. Язык *Java* — естественный язык для решения данной задачи.

Материалы и методы. В первую очередь необходимо рассмотреть наиболее часто встречающиеся методы прогнозирования поведения срочного рынка. Методика исследования основана на изучении различных методов моделирования российского срочного рынка и выделении наиболее эффективного из них. К основным методам прогнозирования рынка относят:

- статистические;
- интуитивные;
- основанные на моделировании;
- экспертные.

Технический анализ — это метод прогнозирования вероятного изменения цен на основе закономерностей, представленных в виде аналогичных изменений цен в прошлом в схожих обстоятельствах. То есть можно утверждать, что технический анализ использует статистические методы и некие модели. Объектами прогнозирования могут быть различные рыночные характеристики: направление приращений, приращения, волатильность, трендовость и т. д. Объект прогнозирования зависит от идеи, с помощью которой трейдер намерен извлекать прибыль из рынка. Большинство процессов на срочном рынке стохастические, то есть их поведение не является детерминированным. Последующее состояние рынка можно описывать как величинами, которые могут быть предсказаны, так и случайными величинами [1]. Например, использование сантимента или паттернов предполагает прогнозирование направления и волатильности, а использование маркетмейкинга предполагает прогнозирование волатильности и ее тайминга.

На срочном рынке помимо валюты существует возможность торговли ценными бумагами и металлами. Проводя операции с российскими ценными бумагами, необходимо помнить, что цены на них постоянно меняются, и важно угадать правильный момент для их покупки и продажи. В этом и есть особенность операции с российскими ценными бумагами.

В связи с нестабильностью экономики многих стран, в том числе России, существует большая возможность заключить невыгодную сделку. На срочном рынке есть понятие индекса относительной силы (*RSI*), с помощью которого можно определить доход от сделки [2]. Для расчета скорости роста дохода предприятия можно использовать метод Тома Демарка, который является довольно действенным для технического анализа ситуации на срочном рынке. При колебаниях рынка для вычисления спреда в случае скупки акций важными будут основополагающие свойства деформированных мартингалов, так как наилучшим прогнозом поведения рынка в таких случаях является изучение его состояния в данный момент [3]. Рынок ценных бумаг России и США не одинаков и при анализе дохода на российском рынке может получиться нулевой результат по отношению к американскому образцу. Это происходит из-за того, что проданные бумаги на российском рынке через несколько минут могут потерять свою ценность, в отличие от американского рынка, где установленный курс на бумаги держится довольно долго. Такая тенденция свидетельствует о стабильности компании и желании остаться как можно дольше на мировом рынке валюты. Но здесь необходимо учитывать вес российского валютного рынка в мировых валютных отношениях [4].

Одно из главных направлений получения дохода на бирже — определение развития курса валют. Каждый биржевик стремится разработать собственный метод прогноза и применить его на практике. На бирже много пригодных для расчета индикаторов, но один из самых распространенных — расчет скользящего среднего. Согласно этому методу расчет проводится за определенный период, при этом вычисляют самые простые реализованные сделки, затем при пересечении индикатора с текущим курсом сделка заключается. Метод достаточно надежен, но требует непрерывного контроля. Чтобы проще было проследить изменение курса валюты, следует применять этот метод для коротких промежутков времени [5].

Существует понятие оценки взвешенного скользящего среднего, с помощью которого отслеживают данные за последнее время, при этом индикатор сглаживает колебание курса. Эта стратегия похожа на предыдущую и данные, полученные при ее использовании, близки к данным, полученным при использовании расчета скользящего среднего. Преимущество этого метода в том, что нужно отслеживать тренды только за последнее время.

Следующий метод — это метод экспоненциального скользящего среднего. При его использовании сравнивают данные за последнее время и данные за более ранний период. Этот метод вычисляет меньше прибыльных сделок, но при этом все сделки совершаются без риска убыточности.

Прогнозирование цен возможно, но лишь в том случае, когда есть связь между их прошлыми значениями и будущими. Эта связь действительно может наблюдаться во время трендов. Трейдеры, наблюдая за однонаправленным изменением цен, реагируют соответствующим образом и заключают сделки в направлении тенденции, создавая положительную связь между изменениями в прошлом и в будущем. Когда рынок растет без коррекций или растет в канале, основная масса спекулянтов осознанно покупает, рассчитывая на продолжение, и самим фактом покупок обеспечивает дальнейший рост. Тренд существует до тех пор, пока основная масса трейдеров, создающих тренд, не начинает фиксировать прибыль. Важным моментом для продолжения тренда является отсутствие контртрендовой торговли, то есть не должно быть слишком массивного давления рыночными ордерами в противоположную сторону. Если видимая структура тренда будет нарушена, то это может повлиять на спекулянтов, создававших своими сделками этот тренд, что приведет к фиксации прибыли и остановке тренда.

Результаты исследования. Среди существующих методов математического моделирования и анализа финансовых рынков в контексте российского срочного рынка в первую очередь необходимо отметить группу реалистичных негауссовских процессов Леви, которые обобщают классическую модель Блэка-Шоулса. Преимуществом данной группы процессов является возможность моделирования скачков цены базового актива и более реальная оценка рисков. Таким образом, методы математического моделирования и анализа финансовых рынков опираются на процессы Леви с постоянной, локальной и случайной диффузионной компонентой. Также существуют модели, имеющие стохастическую волатильность. Таковыми являются модели Хестона, Бейтса и Блашера [6].

Модель ценообразования Блэка-Шоулса определяет теоретическую цену на европейские опционы. Она подразумевает, что если базовый актив торгуется на рынке, то цена опциона на него неявным образом устанавливается самим рынком [7]. Модель получила широкое распространение и может использоваться на практике для анализа финансовых рынков, в том числе срочного. Согласно данной модели, основным элементом определения стоимости опциона является ожидаемая волатильность базового актива. Таким образом, при известной стоимости опциона можно определить уровень волатильности, ожидаемый рынком [8].

Текущая стоимость европейского опциона *call C(S,t)* в момент t до истечения его срока соответствует выражениям:

$$C(S,t) = SN(d1) - Ke^{-r(T-t)}N(d2),$$

$$d1 = \frac{ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}};$$

$$d2 = d1 - \sigma\sqrt{(T-t)},$$

где S — текущая цена базисной акции; $N(x)$ — функция стандартного нормального распределения; K — цена исполнения опциона; r — безрисковая процентная ставка; $(T-t)$ — время до истечения срока опциона (период опциона); σ — волатильность доходности (квадратный корень из дисперсии) базисной акции.

Цена европейского опциона *put* соответствует выражению:

$$P(S,t) = Ke^{-r(T-t)}N(-d2) - SN(-d1).$$

Случайный процесс $X = (Xt)\ t \geq 0$, заданный на вероятностном пространстве (Ω, F, P) и принимающий значения в d-мерном евклидовом пространстве R^d1, называется d-мерным процессом Леви при выполнении следующих условий:

1. Процесс состоит из траекторий, принадлежащих определённому пространству D^d, состоящему из векторных функций, является непрерывным справа и имеет пределы слева.

2. Для любого $n \geq 1$ и набора $0 \leq t0 < t1 < \ldots < tn$ величины $Xt0, Xt1–Xt0, \ldots, Xtn–Xtn–1$ являются независимыми.

3. Процесс однороден по времени. Для любых $s \geq 0$ и $t \geq 0$:

$$Xt + s - Xs = Xt - X0.$$

4. Процесс стохастически непрерывен. Для каждого $t \geq 0$ и $\varepsilon > 0$:

$$\lim_{s - t} P(|Xs - Xt| > \varepsilon) = 0,$$

5. $X0 = 0$.

Процессы в случае конечной меры Леви:

- гауссовский;
- обобщённый пуассоновский;
- модель Мертона;
- модель Коу.

Процессы Леви с бесконечным количеством скачков в любой промежуток времени имеют меру Леви П, обладающую свойством $\Pi(R) = \infty$. Такие процессы активно используются при моделировании финансовых рынков. Здесь можно выделить:

- variance gamma (VGP);
- гиперболические (HP);
- обобщённые гиперболические (GHP);
- нормальные обратные гауссовские (NIG);
- нормальные умеренно стабильные (NTS);
- процессы KoBoL или CGMY.

Процессы Леви позволяют моделировать динамику цен активов максимально гибко, так как содержат две составляющие: броуновское движение (диффузия процесса) и скачкообразный компонент [9]. В настоящее время существует множество моделей, основанных на процессах Леви, которые успешно оперируют динамикой цен различных активов и используются при ценообразовании опционов, так как являются мартингалами. Декомпозиция Леви-Ито разбивает процессы Леви на простые составляющие и помогает понять их природу. Такая декомпозиция является основой для моделирования процессов Леви при помощи суммы двух составляющих: броуновского движения и составного процесса Пуассона. Такая структура стохастического процесса называется скачкообразной диффузией и имеет вид [10]:

$$Xt = yt + \sigma Bt + \sum_{i=1}^{Nt} Yi,$$

где Bt — броуновское движение; Nt — процесс Пуассона, считающий количество скачков процесса X к моменту времени t; Yi — независимые одинаково распределённые случайные величины скачков.

Двумя крайними примерами случая конечной меры Леви являются гауссовский и обобщённый пуассоновский процессы. Если процессы Леви комбинируют в себе оба упомянутых процесса, то они называются дуффузией со скачками. Наиболее интересными моделями такого вида являются модель Мертона и модель Коу [10]. Для ускорения расчётов и обеспечения наглядности авторы разработали приложение на языке программирования *Java*, позволяющее реализовать данные модели.

В языке *Java* весь код хранится в виде классов. Таким образом, набирая исходный файл с расширением *java*, он компилируется в новый файл с байт-кодом. За счёт того, что *Java* спроектирован для выполнения байт-кода, программы, написанные на данном языке, работают с довольно высокой скоростью [11].

Весь расчёт при компиляции будет состоять из нескольких *java*-файлов. В одном из них проведём вычисления процесса Леви с прыжками. Этот файл будет осуществлять итоговое вычисление из всех остальных файлов. В одном из *java*-файлов проведем реализацию формулы Блэка-Шоулза (листинг 1), которая будет необходима в дальнейшем.

Листинг 1: реализация формулы Блэка-Шоулза

```
public static double normcdf(double z) {
      if (z <= -7.0)
            return 0.0;
      else if (z >= 7.0)
            return 1.0;
      else {
            double pi = 3.141592653589793;
            double b1 = -0.0004406;
            double b2 =  0.0418198;
            double b3 =  0.9;
      return 1.0 / (1.0 + exp(-sqrt(pi)*(b1*pow(z,5.0) + b2*pow(z,3.0) +
b3*z)));
      }
}
// Black Scholes call or put price
public static  double BSPrice(double S,double K,double r,double q,double
v,double T,char PutCall) {
      double d1 = (log(S/K) + (r-q+v*v/2.0)*T)/v/sqrt(T);
      double d2 = d1 - v*sqrt(T);
      double BSCall = S*exp(-q*T)*normcdf(d1) - K*exp(-r*T)*normcdf(d2);
      if (PutCall=='C')
            return BSCall;
      else
            return BSCall - S*exp(-q*T) + K*exp(-r*T);
}
}
```

В двух других *java*-файлах рассчитаем абстрактный процесс, который описывает генерацию последовательности цен ко времени. То есть в одном *java*-файле высчитывается явная формула цены опциона, которая учитывает начальную цену, тренд и волатильность (формулы для расчёта цен опционов $C(S,t)$ и $P(S,t)$ приведены выше), в другом *java*-файле происходит симуляция по модели Мертона скачковой диффузии. Формула скачкообразной диффузии учитывает, что скачки будут нормально распределёнными.

Разработав интерфейс программы, после компиляции получим приложение для быстрого и удобного расчёта на основе генерации случайных чисел. Аналогично набор данных генерируется при каждом запуске (рис.1, 2).

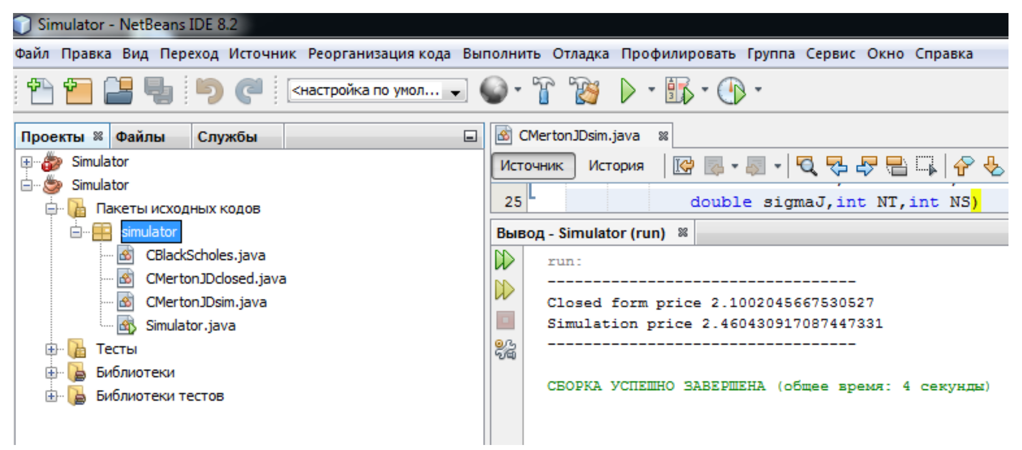


Рис. 1. Первый запуск программы

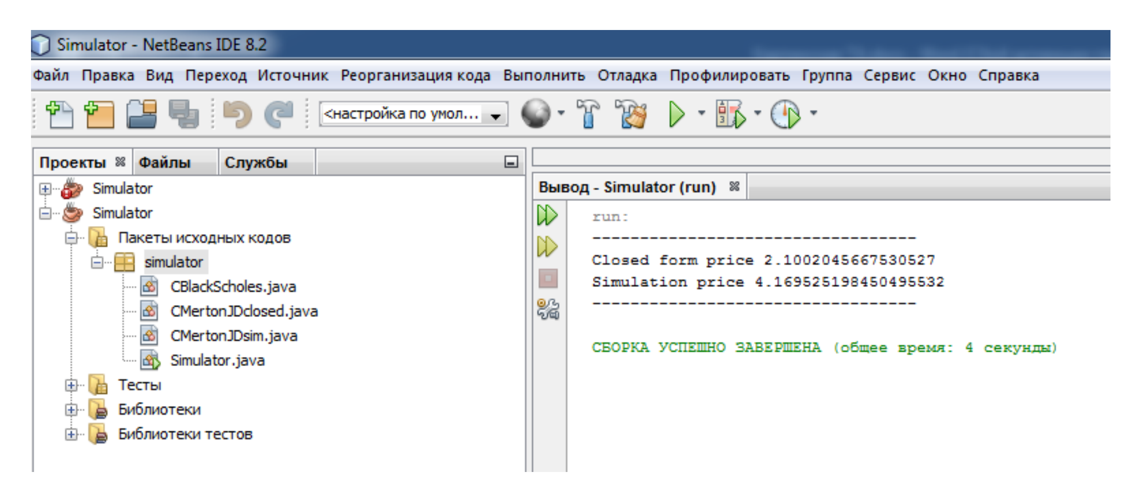


Рис. 2. Второй запуск программы

При первом запуске программы цена симуляции была значительно ближе к явной формуле цены опциона. Таким образом, во втором случае можно было продать опцион более выгодно, чем в первом случае. Проведя вычисления программы большое количество раз, можно спрогнозировать другие варианты для покупки или продажи опциона. Здесь необходимо учитывать все возможные факторы, способные повлиять на рынок. Проведём десятикратный запуск программы, результаты вычисления которого представлены в табл.1.

Таблица 1

Результаты десятикратного запуска программы

№ п/п	*Closed form price*	*Simulation price*
1	2.1002045667530527	2.460430917087447331
2	2.1002045667530527	4.169525198450495532
3	2.1002045667530527	2.472669282703422532
4	2.1002045667530527	1.065976524175292432
5	2.1002045667530527	1.119330912080574833
6	2.1002045667530527	2.687540413685037333
7	2.1002045667530527	1.184835796571303834
8	2.1002045667530527	4.53211404384426131
9	2.1002045667530527	8.00388383946741132
10	2.1002045667530527	1.685687889204974432

Симуляция показывает возможные варианты развития событий на срочном рынке и позволяет оценить убытки. Соответственно, продавать опцион наиболее выгодно в девятом случае при *Simulation price*, равной 8.00388383946741132. Исходя из данного прогноза, владелец опциона может получить наибольший доход от сделки. Для покупки опциона наилучший прогноз имеет место в четвертом случае при *Simulation price*, равной 1.065976524175292432. Таким образом, *Closed form price* является идеальной ценой, а *Simulation price* — это цена, которую выставляет рынок, которая учитывает его изменчивость и скачки. Таким образом, можно распределять свои лимиты на рынке, предсказывая размер убытков и доходов.

Сначала рассчитывается явная формула цены опциона (настоящая цена) *Closed form price* (листинг 2). Она даёт математическое ожидание выплаты по опциону, то есть учитывает все возможные варианты развития событий. Далее запишем необходимые нам ячейки для реализации формулы.

Листинг 2: явная формула цены опциона

```
{       // Expected jump value
        double kappa = exp(muJ + 0.5*sigmaJ*sigmaJ) - 1.0;
        // Initialize the price
        double Price = 0.0;
        double sigman,rn,BSPrice,lambda,Probability;
        for (int n=0; n<N; n++) {
              sigman = sqrt(sigma*sigma + n*sigmaJ*sigmaJ/T);
              rn = r - lambdaJ*kappa + n*log(1.0+kappa)/T;
              BSPrice = CBlackScholes.BSPrice(S0,K,rn,q,sigman,T,PutCall);
```

```
            lambda = lambdaJ*(1.0+kappa);
            Probability = exp(-lambda*T) * pow(lambda*T,(double)n)/factorial(n);
            Price = Price +  Probability*BSPrice;
      }
      return Price;
}
```

После этого в программе реализуется симуляция мертоновской скачковой диффузии (листинг 3). *Simulation price* характеризует цену опциона, зависящую от некоторой имитационной траектории. Методы генерации чисел для абстрактного процесса содержатся непосредственно в файлах с реализуемыми процессами как, например, при расчете явной формулы цены опциона. Для реализации скачков рынка используем генератор случайных чисел.

Листинг 3: симуляция мертоновской скачковой диффузии

```
public class CMertonJDsim {
    public static  double JDsim(char PutCall,double S0,double K,double rf,
            double q,double sigma,double T,
            double lambdaJ,double muJ,
            double sigmaJ,int NT,int NS)
{     // Time increment
      double dt = T/NT;
      // Random number generator and set the seed
      Random rng = new Random();
      // Define the distributions
      double poissrnd = poissonRandomNumber(lambdaJ*dt);
      double N01 = normalDestribution(0.0,1.0);
      double Nus = normalDestribution(muJ - 0.5*sigmaJ*sigmaJ,sigmaJ);
      // Expected value of k, and drift term
      double kappa = exp(muJ) - 1.0;
      double drift = rf - q - lambdaJ*kappa - 0.5*sigma*sigma;
      // Initialize the stock price paths and the payoff
      double Payoff = 0;
      //vector<vector<double> > S (NT,vector<double> (NS));
        double[][] S = new double[NT][NS];
      // Perform the simulation
for (int s=0; s<NS; s++) {
      S[0][s] = S0;
      for (int t=1; t<NT; t++) {
            double J = 0.0;
            if (lambdaJ != 0.0) {
                  int Nt = (int) poissonRandomNumber(rng.nextGaussian());
                  if (Nt > 0)
                        for (int i=0; i<Nt; i++)
                              J += (int) normalDestribution(0,1);
                  }
                  double Z = normalDestribution(0,1);
                  S[t][s] = S[t-1][s]*exp(drift*dt + sigma*sqrt(dt)*Z + J);
            }
            // Calculate the payoffs
            if (PutCall == 'C')
                  Payoff = Payoff + max(S[NT-1][s] - K, 0.0);
            else if (PutCall =='P')
                  Payoff = Payoff + max(K - S[NT-1][s], 0.0);
      }
```

```
        return exp(-rf*T)*(Payoff/NS);
    }
    static double poissonRandomNumber(double lambda) {
        double L = Math.exp(-lambda);
        int k = 0;
        double p = 1;
        do {
            k = k + 1;
            double u = Math.random();
            p = p * u;
        } while (p > L);
        return k - 1;
    }
    static double normalDestribution(double s, double m) {
            // create random object
            Random rand = new Random();
            // generating integer
            double nxt = rand.nextGaussian();
            return nxt * s + m;
    }
}
```

Проведя симуляцию несколько раз, из полученных *Simulation price* можно выбрать среднее значение, которое проиллюстрирует скачки цены опционов. В итоге, чем ближе значение *Closed form price* к одному из значений *Simulation price*, тем более выгодна цена для покупки опционов.

Обсуждение и заключения. Практическим результатом исследования является разработанное приложение, имитирующее скачки рынка и реализующее сложную математическую формулу. Рассмотренная модель процессов Леви, включающих в себя гауссовский и обобщённый пуассоновский процессы, является эффективным методом вычисления важнейших характеристик финансового риска. Она позволяет принимать решения о реализации той или иной торговой стратегии с использованием контрактов на Московской бирже. Результаты исследования свидетельствуют о том, что выбранная для разработки приложения модель скачковой диффузии Мертона является эффективным методом математического моделирования. Данное приложение можно использовать для обучения персонала на рынках с биржевыми рисками. Проведённые расчёты показывают цену, которую выставляет рынок. Она учитывает все возможные варианты развития событий, а также возможные изменения цены опциона, согласно которым можно определить прибыль или убытки. Участник срочного рынка с помощью такого расчёта может принять наиболее выгодное решение для покупки опциона, если симуляция покажет цену ниже установленной рынком, либо для продажи, когда цена симуляции будет наиболее высока.

Установлено, что язык программирования *Java* может эффективно применяться при создании качественных приложений для расчетов на биржах, позволяет уменьшить время математических расчетов и упрощает работу с биржевыми вычислениями. При этом *Java Virtual Machine* является аналогом виртуального компьютера, расположенного в оперативной памяти и интерпретирующего байт-код. Все действия *Java*-программы замкнуты внутри данного виртуального компьютера таким образом, что имеется возможность не допускать их деструктивных действий.

Библиографический список

1. Вавилов, С. А. Финансовая математика. Стохастический анализ : вузовский учебник / С. А. Вавилов, К. Ю. Ерёменко. — Москва : Юрайт, 2017. — 244 с.

2. Осокина, Н. В. Производные финансовые инструменты в современной экономике / Н. В. Осокина, С. Ю. Носкова. // Вестник Кузбасс. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 2. — С. 149–151.

3. Pavlov, I. Optional Sampling Theorem for Deformed Submartingales / I. Pavlov & O. Nazarko // Theory of Probability & Its Applications. — 2015. — Vol. 59. — P. 499–507. DOI: https://doi.org/ 10.1137/ S0040585X97T987259

4. Безруков, А. В. Эконометрическая модель фондового индекса как инструмент статистического мониторинга устойчивости финансового рынка / А. В. Безруков, Ю. И. Аболенцев // Вестник университета. — 2010. — № 6. — С. 236–241.

5. Сокуренко, А. П. Тенденции срочного рынка в России / А. П. Сокуренко // Концепт. — 2015. — Т. 13. — С. 3206–3210. — Режим доступа : http://e-koncept.ru/2015/85642.htm (дата обращения : 20.10.2019).

6. Гречко, А. С. Адекватное моделирование российского срочного рынка / А. С. Гречко, О. Е Кудрявцев, В. В. Родоченко // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. — 2015. — № 6. — С. 63–67.

7. Black, F. The Pricing of Options and Corporate Liabilities / F. Black, M. Scholes // The Journal of Political Economy. — 1973. — Vol. 81, no. 3. — P. 637–654.

8. Schoutens, W. Exotic Options under Levy Models: An Overview / W. Schoutens. — Belgium. — 2004. — P. 4–6.

9. Ефремов, В. А. Моделирование финансовых временных рядов на основе процессов Леви для определения премии опционных контрактов / В. А. Ефремов // Международный научно-исследовательский журнал. — 2012. — № 4 (4). — С. 7–11. — Режим доступа : //research-journal.org/technical/modelirovanie-finansovyx-vremennyx/ (дата обращения : 14.10.2019).

10. Кудрявцев, О. Е. Приближённая факторизация Винера-Хопфа и методы Монте-Карло для процессов Леви / О. Е. Кудрявцев // Теория вероятностей и её применения. — 2019. — Т. 64, Вып. 2. — С. 228–257. DOI: https://doi.org/10.4213/tvp5234

11. Сьерра, Кэти Изучаем *Java* / Кэти Сьерра, Берт Бейтс. — Москва: ЭКСМО, 2015. — 717 с. — Режим доступа : https://book24.ru/product/izuchaem-java (дата обращения : 14.10.2019).

Сдана в редакцию 02.09.2019
Принята к публикации 28.10.2019

Об авторах:

Карпинская Татьяна Александровна,
аспирант кафедры «Информатика и информационные таможенные технологии» Российской Таможенной Академии (РФ, 140015, г. Люберцы, Комсомольский проспект, д. 4),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0076-2622
Karpinski-2@mail.ru

Кудрявцев Олег Евгеньевич,
заведующий кафедрой «Информатика и информационные таможенные технологии» Ростовского филиала Российской Таможенной Академии, (РФ, 344002, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, д. 20), доктор физико-математических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4331-0204
okudr@mail.ru